

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR  
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA  
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA



**“Manual de aplicaciones de herramientas y  
técnicas del mantenimiento Predictivo.”**

PRESENTADO POR:

**MANUEL ALEXANDER ROSA PÉREZ  
LUIS ALONSO MILES HERNÁNDEZ  
JOSÉ RICARDO PÉREZ LÓPEZ**

PARA OPTAR A TÍTULO DE:

**INGENIERO MECÁNICO**

CIUDAD UNIVERSITARIA, ABRIL DE 2009

**UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR**

RECTOR :

**MSc. RUFINO ANTONIO QUEZADA SÁNCHEZ**

SECRETARIO GENERAL :

**LIC. DOUGLAS VLADIMIR ALFARO CHÁVEZ**

**FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA**

DECANO :

**ING. MARIO ROBERTO NIETO LOVO**

SECRETARIO :

**ING. OSCAR EDUARDO MARROQUÍN HERNÁNDEZ**

**ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA**

DIRECTOR :

**ING. JUAN ANTONIO FLORES DÍAZ**

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR  
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA  
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA

Trabajo de Graduación previo a la opción al Grado de:  
**INGENIERO MECÁNICO**

Título :

**“Manual de aplicaciones de herramientas y técnicas del mantenimiento Predictivo.”**

Presentado por :

**MANUEL ALEXANDER ROSA PÉREZ**  
**LUIS ALONSO MILES HERNÁNDEZ**  
**JOSÉ RICARDO PÉREZ LÓPEZ**

Trabajo de Graduación aprobado por :

Docentes Directores :

**ING. FRANCISCO ALFREDO DE LEÓN TORRES**  
**ING. JUAN ANTONIO FLORES DÍAZ**

Docente Director Externo :

**ING. DOUGLAS VLADIMIR MEZQUITA**

San Salvador, Abril de 2009

Trabajo de Graduación aprobado por:

Docentes Directores :

**ING. FRANCISCO ALFREDO DE LEÓN TORRES**

**ING. JUAN ANTONIO FLORES DÍAZ**

Docente Director Externo :

**ING. DOUGLAS VLADIMIR MEZQUITA**

## **AGRADECIMIENTOS.**

Este trabajo de graduación es el resultado de toda la concurrencia de ideas, sugerencias, comentarios hechos en equipo que fueron considerados importantes, por el equipo de trabajo; por eso, se agradece a las distintas empresas que visitamos y nos abrieron sus puertas, a personas profesionales de distintas especialidades, de distintas empresas quienes aportaron desinteresadamente sus experiencias y conocimientos al proyecto.

A las autoridades y personal de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura de la Universidad de El Salvador su apoyo. Así mismo a las autoridades y personal de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la FIA-UES.

A nuestros asesores de tesis: Ing. Francisco Alfredo De León Torres, Ing. Juan Antonio Flores Díaz y al Ing. Douglas Vladimir Mezquita.

A la colaboración indirecta pero no menos importante para el desarrollo de este trabajo, de compañeros estudiantes de la ASEIM.

## DEDICATORIA

A DIOS, padre todo poderoso, por su amor eterno y su misericordia, porque todo lo que soy y todo lo que tengo me ha sido dado por El... Bendito, alabado y glorificado se tu nombre Señor.

A mi padre, por su fe en mí, por su esfuerzo, por su apoyo en los momentos difíciles de mi vida... ¡lo logramos viejo...!

A mi madre, por su amor y dedicación, por su esfuerzo por que a pesar de la distancia estaba tan cerca y nunca me dejó solo... ¡mamá te amo!

A mis hermanas, Jeannette y Wendy, porque su amor a llenado mi vida, su fe en mí, me dio aliento para seguir adelante... las amo mucho.

A mis dos princesas, una por ser lo que me faltaba para estar completo, porque lleno mi vida de amor puro y sincero, por ser fortaleza, por ser mi refugio, porque me impulso a seguir adelante, por sufrir conmigo, por reír conmigo y por estar caminando junto a mí de la mano de Cristo hasta llegar a la meta propuesta, ahí donde esta DIOS... Sandrita te amo. Y a ti mi niña preciosa, mi corazón, mi princesa, tu mi amor que con tu inocencia fuiste el instrumento perfecto para llevarme a los pies del Señor, gracias por tus sonrisas, por tus besos, por tus abrazos, por la luz que irradian tus ojos, nuestro tesoro... ¡Ivanna! te amo mucho... que Dios te bendiga.

A mi demás familia, que no me da abasto esta página para nombrarlos y decirles muchas gracias por su amor, por su apoyo... de corazón les digo que los amo mucho a todos.

Y a mi comunidad, por adoptarme como su hermano en Cristo, especialmente a CAFARNAUM, esa ciudad donde encontré el consuelo para mi alma, ¡qué familia tan preciosa!, hombres y mujeres de valor, gracias por enseñarme a amar.

Ricardo Pérez.

## DEDICATORIA

Dedico primeramente a DIOS Todopoderoso, y le doy gracias por el Don maravilloso de la vida sin el cual no habría podido finalizar este trabajo de graduación, a María Auxiliadora mi madre espiritual y Don Bosco mi padre y maestro que me inspiro a seguirlo como Salesiano.

A toda mi familia, especialmente a mamá Romanita quien desde su sencillez me ha enseñado a no perder la Esperanza dándome aliento a luchar con una de sus célebres frases “Animo!!!!”. A mis hermanos Oscar, Victor, David, que con sus apoyos en mis aflicciones económicos me tendieron su mano para continuar hasta llegar a este punto. A mis hermanas Blanca y Alicia que me auxiliaron desde mi preparación académica en la escuelita.

A Vanessita mi novia que desde que la conocí no dejo de apoyarme y darme su amor, aliento para lograr mi objetivo, Dios quiera me la regale como esposa para apoyarnos mutuamente y sea mi complemento para siempre...

A mis hermanos en Cristo los SALESIANOS COOPERADORES del centro Don Rúa que enseñaron que un profesional sin Dios no está completo; especialmente a la niña Toñita, Noemi y Silvita de Castellanos, que me supieron comprender por tantas ausencias y me confortaron espiritualmente animándome en todo momento.

A los catequistas del Oratorio Domingo Savio.....Padre Francisco por sus consejos y dirección espiritual.

A los compañeros veteranos de batalla de la ASEIM, que me presidieron como Juan de Dios, Nelson Méndez, Henri Cruz y otros que todavía les falta coronar su sueño, especialmente Alex Rivera, William Martínez quienes me acompañaron y compartimos gratos momentos.

A mis amigas y amigos todos .....

A la familia Pérez en particular A Wendy Pérez y Sandra de Pérez por sus finas atenciones en su casa como anfitriones cuando me reunía para trabajar en este proyecto; no, no me estoy olvidando de usted compañero Ricardo, gracias muchas gracias!!!!DIOS LOS BENDIGA.

Luis Miles SS.CC

## DEDICATORIA

Dedico este trabajo primeramente, a Dios todo poderoso, por darme la fuerza y la voluntad que necesitaba para no desmayar cuando estaba agotado y por darme la salud necesaria junto a mi familia.

A mi madrecita que siempre estuvo junto a mí apoyándome y creyendo en mi persona sin importar las veces que le falle, gracias madre por darme el amor que necesité, que Dios te bendiga, Laurita Pérez, te amo.

A mis dos tesoros que siempre me dieron su hombro como apoyo para caminar con pasos firmes y las cuales sufrieron junto a mí, son ustedes hermanas queridas Sandra Xiomara Rosa Pérez y a tí Estela Beatriz Rosa Pérez, las amo con todo mi corazón.

A ti padre que aunque la distancia nos separa siempre conté contigo, cuando más te necesité, eres mi inspiración, Domisiano Rosa, que Dios te bendiga.

A mi tía Clara Isabel Pérez quién fue mi apoyo en todo momento, ofreciéndome su morada y compartiendo su sustento, con el más grande amor que tiene como ser humano, gracias tía por creer en mí en todo momento, que Dios te bendiga.

A mi demás familia que siempre creyó en mí y me dieron palabras de aliento para seguir adelante sin importar que tan difícil fuera el camino.

A mis compañeros de Tesis que unieron su sacrificio junto al mío, para lograr nuestro objetivo, gracias amigos, todos, que saben de mi existencia y me bendicen con su amistad.

A nuestros asesores que con su sabiduría nos guiaron por el mejor camino y por regalarnos su paciencia y comprensión, que Dios los Bendiga.

A Francisco Herrera, Bernardo Salazar, José Luis Márquez, Edwin Rosales, Kelvin Peraza, Henry Cruz y los demás amigos que no menciono pero no son menos importantes, gracias por su apoyo incondicional y por regalarme su preciosa amistad.

Manuel Alexander Rosa Pérez.





## RESUMEN EJECUTIVO.

El manual de aplicaciones de herramientas y técnicas del mantenimiento predictivo esta desarrollado de manera tal, que se convierta en una guía básica de aplicación de las diferentes técnicas que acá se presentan, con la finalidad de aprovechar las ventajas que un buen programa de mantenimiento predictivo implica. Dicho programa es un proceso que involucra una serie de técnicas de diagnóstico destinadas a evaluar la condición de una máquina con el objetivo de detectar una eventual falla y anticiparse a que esta ocurra evitando así una parada no planificada, disminuyendo con ello las pérdidas de producción y los costos de mantenimiento en una empresa.

Se caracteriza las diferentes técnicas o herramientas del mantenimiento predictivo, en él, se desarrollan las técnicas de mayor uso en la industria salvadoreña basándose en su aplicación a casos reales. Además se Identifican las distintas normas internacionales, congruentes con la aplicación de dichas técnicas.

El documento es un texto guía de preparación para personal de mantenimiento mecánico y estudiantes de ingeniería mecánica, de manera tal que sean inducidos a las técnicas predictivas y su correcta aplicación.

Las áreas que se abarcan son: caracterización de cada una de las técnicas que se complementan entre sí en la búsqueda y solución de problemas ayudando a identificar su causa raíz.

El segundo capítulo profundiza el estudio de las técnicas en su aplicación, documentando casos reales ocurridos en empresas de la industria salvadoreña.

A lo largo del manual, se enfatiza la importancia del mantenimiento predictivo a través de sus técnicas y herramientas, determinando la condición de una máquina, esto permite establecer si se encuentra trabajando dentro de los rangos de funcionamiento normal, o si está entrando en los niveles de alarma previamente establecidos, permitiendo determinar el momento en que ocurrirá una falla, estableciendo luego de los análisis correspondientes a la

causa probable de las misma, para luego ejecutar las tareas de mantenimiento pertinentes antes que la falla ocurra.

Las diferentes etapas de esta investigación contribuyen a la formación de criterios básicos, plasmados en este manual para la implementación de un programa de mantenimiento predictivo.

En la parte final del trabajo se aborda la propuesta para la implementación de un laboratorio de ensayos no destructivos; además se contemplan los diferentes niveles de certificación necesarios del personal encargado de aplicar las distintas técnicas, esto con el fin de que la Escuela de Ingeniería Mecánica pueda en su momento establecer una materia electiva e impartir diplomados sobre estas técnicas.

De esta forma, se espera que la comunidad estudiantil de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad de El Salvador realice en un futuro próximo más estudios relacionados al mantenimiento predictivo, a fin de que los conocimientos adquiridos vayan evolucionando al mismo paso que los programas de mantenimiento y la tecnología aplicada en ellos.

# INDICE GENERAL

<i>Contenido</i>	<i>Pág.</i>
<b>INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>i</b>
<b>I. TÉCNICAS DEL MANTENIMIENTO PREDICTIVO</b>	<b>1</b>
<b>1.0 Termografía Infrarrojo.....</b>	<b>4</b>
1.1 Introducción.....	4
1.2 Historia del infrarrojo.....	4
1.3 Sistemas de medición termográfica.....	5
1.4 Teoría básica.....	8
1.4.1 Energía térmica.....	8
1.4.2 Calor.....	8
1.4.3 Transferencia de calor.....	8
1.4.4 Emisividad.....	9
1.5 Instrumentación.....	11
1.6 Cálculo de emisividad.....	13
1.7 Resolución y óptica.....	14
1.8 Rango de temperatura y sensibilidad térmica.....	16
1.9 Paleta de colores.....	16
1.10 Perspectiva.....	17
1.11 Puntos fríos.....	17
1.12 Tabla de clasificación de fallas eléctricas.....	18
1.13 Reportes.....	18

<b>1.14</b> Aplicaciones.....	20
<b>1.14.1</b> Aplicaciones eléctricas.....	20
<b>1.14.2</b> Aplicaciones mecánicas.....	21
<b>1.14.3</b> Aplicaciones en procesos.....	22
<b>1.15</b> Ventajas.....	22
<b>1.16</b> Fundamentos para un programa de inspección infrarroja de calidad.....	23
<b>1.17</b> Responsabilidades del inspector termografista.....	27
<b>1.18</b> Nueve pasos fundamentales para implantar un programa de mantenimiento predictivo basado en inspecciones infrarrojas.....	28
<b>2.0 Ultrasonido.....</b>	<b>30</b>
<b>2.1</b> Introducción.....	30
<b>2.1.1</b> Definición de ultrasonido.....	30
<b>2.1.2</b> Historia de la inspección por ultrasonido.....	30
<b>2.1.3</b> Aplicaciones del ultrasonido.....	31
<b>2.1.4</b> Ventajas y limitaciones del ultrasonido industrial.....	32
<b>2.2</b> Principios acústicos.....	33
<b>2.2.1</b> Oscilación.....	34
<b>2.2.2</b> Ondas.....	37
<b>2.2.3</b> Tipos de ondas.....	40
<b>2.2.4</b> Sonido.....	40
<b>2.3</b> Principios básicos de los instrumentos.....	48
<b>2.3.1</b> Generación de ultrasonido.....	49

2.3.2 Procedimiento de ensayo ultrasónico.....	51
2.3.3 Palpadores.....	55
2.3.4 Equipos de ensayo ultrasónico.....	69
2.3.5 Sistemas de representación.....	71
2.3.6 Bloques patrones de calibración y de referencia.....	74
2.4 Principios básicos de aplicación.....	77
2.4.1 Acoplamiento.....	77
2.4.2 Superficie de la pieza de ensayo.....	78
2.4.3 Selección de los palpadores.....	81
2.4.5 Técnica de inmersión.....	81
2.4.6 Interpretación de la presentación en la pantalla de TRC.....	85
2.4.7 Determinación de la forma y tamaño de discontinuidades.....	86
2.4.8 Consideraciones en la construcción de piezas. ....	89
2.4.9 Procedimientos generales del ensayo ultrasónico.....	90
<b>3.0 Análisis por Líquidos Penetrantes.....</b>	<b>94</b>
3.1 Requisitos de la inspección por líquidos penetrantes.....	95
3.1.1 Aplicaciones.....	96
3.2 Ventajas generales de los líquidos penetrantes.....	96
3.3 Limitaciones generales de los líquidos penetrantes.....	96
3.4 Descripción general del método.....	97
3.4.1 Limpieza inicial y secado.....	97
3.4.2 Aplicación del líquido penetrante y tiempo de penetración.....	97

<b>3.4.3</b> Limpieza intermedia.....	97
<b>3.4.4</b> Secado.....	98
<b>3.4.5</b> Aplicación del revelador.....	98
<b>3.4.6</b> Inspección y evaluación.....	98
<b>3.4.7</b> Limpieza final.....	98
<b>3.5</b> Clasificación de líquidos penetrantes.....	99
<b>3.5.1</b> Tipos de métodos penetrantes.....	100
<b>3.6</b> Principios físicos del ensayo.....	102
<b>3.6.1</b> Propiedades de líquidos penetrantes.....	102
<b>3.7</b> Otros tipos de penetrantes.....	108
<b>3.8</b> Mecanismos del revelado.....	108
<b>3.8.1</b> Granulometría de los polvos.....	110
<b>3.9</b> Formulación básica de líquidos penetrantes con base oleosa y no oleosa.....	110
<b>3.9.1</b> Formulaciones básicas.....	111
<b>3.10</b> Procesamiento.....	114
<b>3.10.1</b> Preparación de la pieza de trabajo, tratamiento, identificación y protección de las áreas que no serán inspeccionadas. ....	116
<b>3.10.2</b> Aplicación del agente penetrante.....	119
<b>3.11</b> Ensayo de acuerdo con instrucciones escritas.....	125
<b>3.12</b> Registro de indicaciones.....	126
<b>3.12.1</b> Informes escritos.....	126
<b>3.12.2</b> Formulario de ensayo.....	128
 <b>4.0</b> Análisis con partículas magnéticas.....	 130

<b>4.1</b> Ventajas y limitaciones del método.....	130
<b>4.2</b> Conceptualización básica para la inspección por partículas magnéticas.....	132
<b>4.2.1</b> Magnetismo.....	132
<b>4.2.2</b> Polos magnéticos.....	132
<b>4.2.3</b> Tipos de materiales magnéticos.....	133
<b>4.2.4</b> Campo magnético debido a una corriente eléctrica. ....	135
<b>4.2.5</b> Distribución de las líneas de inducción magnéticas.....	139
<b>4.2.6</b> Inspección por partículas magnéticas.....	140
<b>4.3</b> Tipos de discontinuidades (descripción de partículas magnéticas).....	141
<b>4.4</b> Secuencia de la inspección.....	142
<b>4.4.1</b> Corriente de magnetización.....	142
<b>4.4.2</b> Técnicas de magnetización.....	143
<b>4.4.3</b> Aplicación de las partículas magnéticas.....	160
<b>4.4.4</b> La desmagnetización de una pieza. ....	163
<b>4.5</b> Ventajas de las partículas magnéticas.....	165
<b>4.6</b> Limitaciones de las partículas magnéticas.....	166
<b>4.7</b> Otros métodos de inspección.....	167
<b>4.7.1</b> Inspección con gomas magnéticas.....	167
<b>4.7.2</b> Impresión magnética.....	170
<b>4.7.3</b> Pinturas magnéticas.....	171
<b>5.0</b> <b>Análisis por corrientes de Eddy</b> .....	175
<b>5.1</b> Introducción.....	175

5.1.1	Definición de las corrientes de Eddy.....	175
5.1.2	Historia de las corrientes de Eddy.....	175
5.1.3	Aplicaciones de las corrientes de Eddy en pruebas no destructivas.....	175
5.1.4	Ventajas y limitaciones de las corrientes de Eddy.....	177
5.2	Principio de las corrientes de Eddy.....	179
5.2.1	Principios para la generación de corrientes de Eddy.....	180
5.2.2	Profundidad de la penetración y de la densidad de corriente.....	183
5.2.3	Retraso de la fase.....	185
5.3	Principios básicos de los instrumentos.....	185
5.3.1	Instrumentos de la corriente de Eddy.....	185
5.3.2	Circuitos resonantes.....	186
5.3.3	Plano complejo de la impedancia (alcance del remolino).....	187
5.3.4	Medidor análogo.....	189
5.3.5	Puntas de prueba (modo de operación).....	190
5.3.6	Puntas de prueba.....	193
5.3.7	Puntas de prueba de blindaje de carga.....	196
5.3.8	Diseño de la bobina (punta de prueba).....	198
5.3.9	El equilibrio de la impedancia.....	199
5.4	Procedimientos.....	201
5.4.1	Estándares de referencia.....	201
5.4.2	Filtración de la señal.....	202
5.5	Usos.....	207



5.5.1	Grietas superficiales.....	207
5.5.2	Detección de grieta superficial usando el barrido de las puntas de prueba.....	210
5.5.3	Inspecciones de tubos.....	216
5.5.4	Medidas de conductividad.....	217
5.5.5	Medidas de conductividad para la verificación del tratamiento térmico.....	219
5.5.6	Medidas de espesores de materiales delgados.....	221
5.5.7	Medidas de espesor de capas no conductoras en materiales conductores.....	224
5.6	Técnicas avanzadas.....	226
5.6.1	Exploración.....	226
5.6.2	Técnicas con armónicos y múltiplos.....	227
5.6.3	Frecuencia de barrido.....	229
5.6.4	Inspección pulsada de la corriente de Eddy.....	231
5.6.5	Detección alejada del campo.....	232
	<b>6.0 Análisis por radiografía industrial (Rayos X).....</b>	<b>234</b>
6.1	Radiografías y fotografías.....	234
6.1.1	Equipo.....	238
6.1.2	Indicadores de calidad de imagen ICI (Penetró metros).....	239
6.2	Técnicas empleadas en la inspección radiográfica industrial.....	244
6.2.1	Características de los rayos X y gamma.....	245
6.2.2	Isótopos radiactivos comerciales.....	245
6.3	Rayos X.....	246
6.3.1	El principio de la radiografía.....	246

<b>6.3.2</b> Las propiedades de los rayos X.....	247
<b>6.3.3</b> Procedimiento de la inspección.....	250
<b>6.4</b> Gammagrafia.....	251
<b>6.5</b> Requisitos y secuencia de la inspección por radiografía industrial.....	255
<b>6.6</b> Aplicaciones de la radiografía industrial.....	256
<b>6.7</b> Ventajas de la radiografía industrial.....	258
<b>6.8</b> Limitaciones de la radiografía industrial.....	259
<b>6.9</b> Procesado de la película.....	260
<b>6.9.1</b> La base. ....	260
<b>6.9.2</b> La emulsión.....	261
<b>6.9.3</b> La capa protectora.....	261
<b>6.9.4</b> El proceso de elaboración de película.....	262
<b>6.10</b> Clasificación de la película.....	263
<b>6.10.1</b> Evaluación de calidad de imagen.....	263
<b>7.0</b> <b>Análisis motores eléctricos.....</b>	266
<b>7.1</b> Introducción.....	266
<b>7.2</b> Técnicas de diagnóstico con el motor fuera de servicio.....	267
<b>7.2.1</b> Comprobación del estado del aislamiento del motor.....	267
<b>7.2.2.</b> Ensayos de aislamiento.....	271
<b>7.3</b> Normas IEEE para el diagnóstico de fallas en los aislamientos de máquinas rotativas.....	283
<b>7.3.1.</b> IEEE 43 – Resistencia de aislamiento e índice de polarización (IP)...	284
<b>7.3.2.</b> IEEE 95 – Alta tensión continua.....	290

<b>8.0 Análisis de aceites.....</b>	<b>293</b>
<b>8.1 Introducción.....</b>	<b>293</b>
<b>8.2 Fundamentos de lubricación.....</b>	<b>294</b>
<b>8.2.1 Las funciones de un lubricante.....</b>	<b>294</b>
<b>8.2.2 Consideraciones del aceite básico.....</b>	<b>295</b>
<b>8.2.3 Fundamentos de lubricación.....</b>	<b>298</b>
<b>8.3 Análisis de aceite y mantenimiento basado en condición.....</b>	<b>301</b>
<b>8.4 Control de contaminación.....</b>	<b>302</b>
<b>8.4.1 Contaminación por partículas.....</b>	<b>303</b>
<b>8.4.2 Contaminación por humedad.....</b>	<b>306</b>
<b>8.4.3 Contaminación por combustible.....</b>	<b>309</b>
<b>8.4.4 Contaminación por hollín.....</b>	<b>310</b>
<b>8.4.5 Contaminación por glicol.....</b>	<b>312</b>
<b>8.5 Métodos de muestreo de aceite.....</b>	<b>313</b>
<b>8.5.1 Localizaciones de muestreo en sistemas circulatorios.....</b>	<b>314</b>
<b>8.5.2 Muestreo en zona viva en sistemas circulatorios.....</b>	<b>319</b>
<b>8.5.3 Muestreo de líneas circulantes de baja presión.....</b>	<b>322</b>
<b>8.5.4 Muestreo en sistemas no circulantes.....</b>	<b>324</b>
<b>8.5.5 Muestreo por succión por manguera plástica.....</b>	<b>325</b>
<b>8.5.6 Botellas y dispositivos de muestra.....</b>	<b>328</b>
<b>8.5.7 Consejos importantes para un muestreo de aceite efectivo.....</b>	<b>330</b>
<b>8.5.8 Frecuencia de muestreo de aceite.....</b>	<b>331</b>

<b>8.5.9</b> Registro del equipo para análisis de aceite.....	334
<b>8.5.10</b> Etiquetas e identificación de botellas de muestra.....	335
<b>8.6</b> Análisis y pruebas del aceite.....	336
<b>8.6.1</b> Razones para realizar análisis de aceite.....	336
<b>8.6.2</b> Revisión de las pruebas de análisis de aceite más comunes.....	338
<b>8.7</b> Objetivos, límites, diagnóstico y administración de información.....	356
<b>8.7.1</b> Establecimiento de límites y objetivos.....	356
<b>8.7.2</b> Interpretación y aplicación de resultados de análisis de aceite.....	362
<b>8.7.3</b> Análisis de campo (En Sitio).....	364
<b>8.7.3.1</b> Detección de partículas de desgaste.....	364
<b>8.7.3.2</b> Análisis de partículas de desgaste.....	365
<b>8.7.3.3</b> Viscosidad anormal.....	366
<b>8.7.3.4</b> Contaminación por humedad.....	366
<b>8.7.3.5</b> Agotamiento de aditivos.....	366
<b>8.7.3.6</b> Estabilidad de oxidación.....	366
<b>8.7.3.7</b> Contaminación por glicol.....	367
<b>8.7.3.8</b> Dilución con combustible.....	367
<b>8.7.3.9</b> Contaminación con hollín y dispersancia.....	368
<b>8.7.3.10</b> Reserva alcalina.....	369
<b>8.7.3.11</b> Aceite incorrecto.....	370
<b>8.7.3.12</b> Falla térmica.....	370
<b>8.7.3.13</b> Condiciones corrosivas.....	371

8.7.4 Documentación y reporte de resultados del análisis de aceite.....	371
8.7.5 Integración del análisis de aceite con otras técnicas de monitoreo de condición.....	373
<b>9.0 Vibraciones mecánicas.....</b>	<b>374</b>
9.1 Introducción.....	374
9.2 Principios básicos.....	374
9.2.1 Vibración.....	374
9.2.2 Definiciones.....	375
9.2.3 Dominio del tiempo.....	376
9.2.4 Valor global.....	378
9.2.6 Amplitud de vibración (parámetros medibles).....	380
9.2.7 Factores de escala de la amplitud.....	381
9.2.8 Unidades de medición.....	382
9.2.9 Sensores de medición.....	383
9.2.10 Monitoreo de múltiples parámetros.....	387
9.2.11 Aplicación de sensores.....	388
9.2.12 Resonancia.....	389
9.2.13 Detección y análisis.....	390
9.3 Las mediciones.....	391
9.3.1 Configuración de las mediciones.....	391
9.3.2 Selección de las máquinas.....	392

9.3.3 Configuración de la base de datos.....	393
9.3.4 Planos de medición.....	393
9.3.5 Posición del sensor.....	394
9.3.6 Fijación del cable.....	396
9.3.7 Métodos de montaje.....	396
9.3.8 Determinación de $F_{max}$ .....	403
9.4 Configuración de alarmas.....	404
9.4.1 Severidad de la vibración.....	406
9.4.2 Tendencia del valor global.....	407
9.4.3 Envolvente de espectro.....	408
9.4.4 Bandas espectrales.....	409
9.4.5 Alarmas de fase.....	410
9.4.6 Criterios de excepción.....	410
9.5 Análisis de espectros y análisis de fase.....	411
9.5.1 Análisis de espectro FFT.....	411
9.5.2 Técnicas de análisis espectral.....	412
9.5.3 Modelo espectral.....	416
9.5.4 Ejemplo de espectros.....	417
9.5.5 Bandas laterales (sidebands).....	418
9.5.6 Armónicas.....	419
9.5.7 Diagrama de cascada.....	419
9.5.8 Fase.....	420

<b>9.5.9</b>	Interpretación de la fase.....	421
<b>9.5.10</b>	Medición de fase.....	423
<b>9.5.11</b>	Análisis de fase.....	424
<b>9.6</b>	Métodos de procesamiento de señales.....	426
<b>9.6.1</b>	Procesamiento de señales.....	426
<b>9.6.2</b>	Envolvente.....	428
<b>9.6.3</b>	Filtro de envolvente.....	429
<b>9.6.4</b>	Tabla de severidad de envolvente.....	431
<b>9.6.5</b>	SEE Technology (Espectro de emisión de energía).....	431
<b>9.6.6</b>	SEE análisis numérico.....	433
<b>9.6.7</b>	SEE análisis de espectros.....	434
<b>9.6.8</b>	HFD (high frequency detection).....	434
<b>9.7</b>	Análisis de problemas comunes.....	435
<b>9.7.1</b>	Desbalanceo.....	435
<b>9.7.2</b>	Desbalanceo causa y efecto.....	437
<b>9.7.3</b>	Desbalanceo – diagnóstico.....	438
<b>9.7.4</b>	Desalineación.....	440
<b>9.7.5</b>	Desalineación – causa y efectos.....	441
<b>9.7.6</b>	Desalineación – diagnóstico.....	442
<b>9.7.7</b>	Desalineación – resumen.....	443
<b>9.7.8</b>	Eje torcido.....	444
<b>9.7.9</b>	Eje torcido – diagnósticos.....	445

<b>9.7.10</b> Flojedades mecánicas.....	446
<b>9.7.11</b> Flojedades mecánicas diagnósticos.....	447
<b>9.7.12</b> Cojinetes desalineados.....	448
<b>9.8</b> Monitoreo de rodamientos.....	448
<b>9.8.1</b> Fallas en los rodamientos.....	448
<b>9.8.2</b> Curva típica de falla de rodamientos.....	450
<b>9.8.3</b> Frecuencias de fallas de rodamientos.....	450
<b>9.8.4</b> Espectro de frecuencias de fallas.....	451
<b>9.8.5</b> Etapas de la avería.....	453
<b>9.9</b> Tabla de análisis de fase.....	454
<b>9.10</b> Ejemplo de diagnóstico analizando la fase.....	455
<b>9.11</b> Orbitas.....	457
<b>9.12</b> Diagrama de bode.....	459
<b>9.13</b> Diagramas polar/Nyquist.....	460
<b>9.14</b> Análisis de onda.....	461
<b>9.14.1</b> Promedio en tiempo síncrono.....	465
<b>II CASOS DE APLICACIÓN DE LAS TÉCNICAS PREDICTIVAS.....</b>	<b>467</b>
<b>10.0 Inspección del piñón de ataque del reductor de baja de un     molino de caña.....</b>	<b>470</b>
<b>10.1</b> Introducción.....	<b>470</b>
<b>10.2</b> Descripción del activo.....	<b>470</b>
<b>10.3</b> Técnicas aplicadas.....	<b>471</b>



<b>10.4</b>	Inspección por partículas magnéticas.....	471
<b>10.4.1</b>	Resultados de inspección.....	474
<b>10.5</b>	Inspección por líquidos penetrantes.....	475
<b>10.6</b>	Medición de la profundidad de la grieta mediante la técnica de ultrasonido...	479
<b>10.6.1</b>	Paso 1: calibración del equipo.....	479
<b>10.6.2</b>	Paso 2: selección del palpador.....	481
<b>10.6.3</b>	Paso 3: acoplamiento.....	482
<b>10.6.4</b>	Paso 4: sondeo del área de la falla.....	482
<b>10.6.5</b>	Paso 5: monitoreo de la señal de la gráfica.....	484
<b>10.7</b>	Resultados De Inspección.....	485
<b>10.8</b>	Estudio de Costos.....	485
<b>11.0</b>	<b>Fallo en rodamiento lado acople del motor de transportadora de bagazo.....</b>	<b>489</b>
<b>11.1</b>	Introducción.....	489
<b>11.2</b>	Detección de un parámetro de vibración fuera de lo normal.....	489
<b>11.3</b>	Estudio de costos.....	492
<b>12.0</b>	<b>Diagnóstico de desbalance en ventilador.....</b>	<b>496</b>
<b>12.1</b>	Análisis de la tendencia de vibración en el ventilador.....	496
<b>12.2</b>	Analizando el espectro de vibración.....	497
<b>12.3</b>	El espectro luego de un balanceo.....	498
<b>III LABORATORIO DE TECNICAS PREDICTIVAS.....</b>		<b>499</b>

<b>Introducción.....</b>	502
<b>13.0</b> Termografía en un departamento de predictivo.....	504
<b>13.1</b> Las aplicaciones de la termografía.....	504
<b>13.2</b> Instrumentación.....	506
<b>13.3</b> Las normas.....	509
<b>13.4</b> Capacitación.....	510
<b>14.0</b> Ultrasonido en un laboratorio de predictivo.....	511
<b>14.1</b> Las aplicaciones del ultrasonido.....	511
<b>14.2</b> Instrumentación.....	511
14.2.1 Medidores de espesores.....	511
<b>14.2.2</b> Detectores de fallas portátiles por ultrasonido.....	514
<b>14.3</b> Las normas.....	516
<b>14.3.1</b> Normas oficiales mexicanas relacionadas con ultrasonido.....	516
<b>14.4</b> Capacitación.....	517
<b>14.4.1</b> Uso de equipos y medición ultrasónica de espesores.....	517
<b>14.4.2</b> Ensayos ultrasónicos básicos. Nivel I.....	518
<b>14.4.3</b> Inspección ultrasónica de soldaduras nivel II.....	519
<b>14.4.4</b> Detección ultrasónica avanzada y tamaño.....	520
<b>15.0</b> Líquidos penetrantes en un laboratorio de predictivo.....	522

<b>15.1</b> Las aplicaciones de los líquidos penetrantes.....	522
<b>15.2</b> Instrumentación.....	523
<b>15.3</b> Las normas.....	524
<b>15.4</b> Capacitación.....	528
<b>16.0</b> Partículas magnéticas en un laboratorio de predictivo.....	529
<b>16.1</b> Las aplicaciones las partículas magnéticas.....	529
<b>16.2</b> Instrumentación.....	529
<b>16.3</b> Las normas.....	531
<b>16.4</b> Capacitación.....	532
<b>17.0</b> Análisis de aceites en un laboratorio de predictivo.....	533
<b>17.1</b> Las aplicaciones del análisis de aceite.....	533
<b>17.2</b> Instrumentación.....	538
<b>17.3</b> Las normas.....	540
<b>17.4</b> Capacitación.....	540
<b>17.4.1</b> Curso básico de análisis de aceite.....	540
<b>17.4.2</b> Aplicación del programa de mantenimiento análisis de aceite...	541
<b>18.0</b> Análisis de vibraciones mecánicas.....	542
<b>18.1</b> Las aplicaciones del análisis de vibraciones mecánicas.....	540
<b>18.2</b> Instrumentación.....	543
<b>18.3</b> Las normas.....	544
<b>18.4</b> Capacitación.....	545
<b>CONCLUSIONES</b> .....	547

<b>RECOMENDACIONES.....</b>	<b>548</b>
<b>REFERENCIAS.....</b>	<b>549</b>
<b>ANEXOS.....</b>	<b>552</b>
<b>APÉNDICES.....</b>	<b>564</b>
<b>GLOSARIO.....</b>	<b>581</b>

## **Introducción general**

El mantenimiento predictivo es el mantenimiento basado en la condición de la máquina o sus componentes, la cual se chequea en intervalos regulares programados para detectar una falla inicial y monitorear su comportamiento. Los intervalos pueden ser en meses, días, horas e inclusive micro segundos, tal es el caso de los sistemas de monitoreo en línea como los de vibraciones, ampliamente usado en la industria mundial.

El termino predecir, da idea a un concepto de anunciar un hecho futuro, por intuición, suposición, adivinación, etc. Desde luego, en Ingeniería no cabe adivinación pero sí medir, observar, comparar.

Nos ocupa predecir cuándo probablemente fallará una máquina o un elemento de máquina que por su importancia pueda parar un proceso productivo. Pero la predicción mecánica no es del todo saber el tiempo que queda de vida del elemento sino descubrir que un determinado fallo ha comenzado o ha surgido, afín de evaluar impactos y tomar decisiones por lo que es evidente, que de no tomar medidas, definitivamente el fallo crecerá y la máquina no podrá producir según lo planeado. Desde el punto de vista económico, por ejemplo, queda claro que es más barato comprar y sustituir un aceite en mal estado que una máquina entera. Pero bajo un escenario de reducción presupuestaria, ¿hasta cuándo podemos esperar para cambiar el aceite?. De la misma manera podemos razonar al descubrir con vibraciones que un rodamiento está dañado, o con una imagen termográfica que muestra la temperatura excesiva por la sección mal dimensionada de un conductor eléctrico.

De esta forma, las tecnologías predictivas nos ayudan a ver los fallos incipientes de las máquinas, que de otro modo, sólo nos avisaría cuando ya no hay tiempo de salvar la máquina o el elemento en sí. Entre estas técnicas se encuentran las más usadas, medición de Vibraciones, Análisis de Aceites, Termografía, Líquidos Penetrantes, Partículas Magnéticas, entre otras.

Un verdadero ***Plan de Mantenimiento Predictivo*** debe emplear varias técnicas, por lo que una y otra se complementa de tal forma, que ayudan a la visión global del problema o resolución de una avería.

# **CAPÍTULO I**

## **TÉCNICAS DEL MANTENIMIENTO PREDICTIVO**

## **SUMARIO**

---

Existen muchas técnicas en el mantenimiento predictivo, en este capítulo se estudiarán las de mayor relevancia caracterizándolas para generar una decisión de su posible uso de acuerdo a las circunstancias del estado de un equipo o una pieza en particular.

Dentro de este capítulo se encontrarán guías o lineamientos para llevar a cabo la aplicación de cada una de las técnicas de manera de obtener resultados óptimos en su aplicación.

## INDICE

<i>Contenido</i>	<i>Pág.</i>
<b>1.0 Análisis por termografía Infrarroja.....</b>	<b>4</b>
<b>2.0 Análisis por ultrasonido.....</b>	<b>30</b>
<b>3.0 Análisis por Líquidos Penetrantes.....</b>	<b>94</b>
<b>4.0 Análisis con partículas magnéticas.....</b>	<b>130</b>
<b>5.0 Análisis por corrientes de Eddy.....</b>	<b>175</b>
<b>6.0 Análisis por radiografía industrial (Rayos X).....</b>	<b>234</b>
<b>7.0 Análisis motores eléctricos.....</b>	<b>266</b>
<b>8.0 Análisis de aceites.....</b>	<b>293</b>
<b>9.0 Vibraciones mecánicas.....</b>	<b>374</b>



## **1.0 Análisis por termografía infrarroja**

---

### **1.1 Introducción**

Todo lo que nos rodea, incluso nuestro propio cuerpo, emite constantemente energía térmica al medio ambiente. Esta energía invisible es emitida en la forma de energía radiante infrarroja.

Cuando un objeto se “calienta”, este va a irradiar más y más energía térmica desde su superficie, nosotros podemos sentir esta radiación infrarroja, sin embargo nunca podremos verla sin la ayuda de algún tipo de instrumento infrarrojo.

En la industria la temperatura es el parámetro o variable de medición usada con más frecuencia, ya que la medición de temperatura nos proporciona una excelente indicación de la condición de un objeto. La temperatura es un factor relacionado con casi todos los procesos, equipos o sistemas eléctricos y mecánicos.

La temperatura de un objeto, puede ser medida por métodos de contacto o no-contacto. En muchas situaciones, es conveniente hacer registros de no-contacto, ya sea por razones de seguridad, por limitaciones de acceso al objeto, o simplicidad.

La termografía es una técnica de no-contacto para la determinación de temperatura de un cuerpo y se basa en la medición de la radiación en el espectro infrarrojo del objeto en estudio, para ello son usados diversos sistemas, con o sin imágenes “térmicas”.

### **1.2 Historia del infrarrojo.**



**Fig. 1-1: Experimento de Herschel.**

En el año 1800, William Herschel hizo un descubrimiento muy importante. Estaba interesado en aprender cuánto calor pasaba través de los filtros coloreados con los que observaba el sol, ya que había notado que la cantidad de calor que transmitían dependía del color. Herschel pensó que los colores en sí podrían filtrar distintas cantidades de

calor, por lo que diseñó un experimento muy original para comprobar su hipótesis. Herschel hizo pasar luz solar a través de un prisma de cristal para generar un espectro: el *arco iris*, el cual se forma cuando la luz se divide en los colores que la componen (Fig. 1-1). Luego midió la temperatura de cada color. Para ello Herschel utilizó tres termómetros con bulbos ennegrecidos para absorber mejor el calor. Colocó un bulbo en cada color, mientras que otros dos fueron colocados fuera del espectro, como muestras de control. Al medir las temperaturas de la luz violeta, azul, verde, amarilla, naranja y roja, notó que cada color tenía una temperatura mayor que los termómetros de control, y que la temperatura de los colores del espectro aumentaba al ir del violeta al rojo. Después de realizar ese experimento, Herschel decidió medir la temperatura en una zona ubicada un poco más allá de la luz roja del espectro, al parecer desprovista de luz. Para su sorpresa, descubrió que esta región tenía la temperatura más alta de todas.

Herschel hizo otros experimentos con lo que llamó “rayos caloríficos”, que existían más allá de la región roja del espectro. Encontró que eran reflejados, refractados, absorbidos y transmitidos igual que la luz visible. Herschel había descubierto una forma de luz o radiación ubicada más allá de la luz roja. Estos “rayos caloríficos” fueron posteriormente denominados *rayos infrarrojos* o *radiación infrarroja* (el prefijo *infra* significa *debajo*). El experimento de Herschel es importante no sólo porque condujo al descubrimiento de los rayos infrarrojos, sino también porque fue la primera vez que se demostró que había formas de luz imposibles de percibir con nuestros propios ojos. El prisma y el espejo originales de Herschel se exhiben en el Museo Nacional de Ciencias e Industrias de Londres, Inglaterra.

### **1.3 Sistemas de medición termográfica.**

- a. Sin imágenes térmicas:** Los sistemas más simples son llamados radiómetros, termómetros infrarrojos o pirometros y registran la radiación que emite el cuerpo y convierte el voltaje de salida del detector del instrumento a un valor calibrado de temperatura.
- b. Con imágenes térmicas:** Estos utilizan detectores bi-dimensionales que miden la radiación emitida por un objeto y a través de procesamiento electrónico, generan una

imagen que representa el patrón térmico de la superficie del objeto en estudio. Una cámara termográfica produce una imagen en vivo (Visualizada como fotografía de la temperatura de la radiación). Las cámaras miden la temperatura de cualquier objeto o superficie de la imagen y producen una imagen con colores que interpretan el diseño térmico con facilidad. Una imagen producida por una cámara infrarroja es llamada: Termografía o Termograma (ver Fig. 1-2).



**Fig. 1-2: Un Termograma presenta un diseño térmico de la superficie del objeto bajo análisis.**

La termografía infrarroja se clasifica como sigue:

- a. Cualitativa.** Es la práctica de obtener información de la estructura, sistema, objeto o proceso a través de observarlo con imágenes de la radiación infrarroja, grabarlas y presentar esa información.
- b. Cuantitativa.** Es la práctica de medir las temperaturas de los patrones de la radiación infrarroja.

Una inspección infrarroja, tiene por objetivo, el uso de un equipo detector infrarrojo, para proveer información térmica específica, y la documentación relacionada acerca de la estructura, sistema, objeto o proceso bajo estudio.

Entonces, son utilizados diversos sistemas de medición, y estos se clasifican como:

- a.** De medición radiométrica, sin imagen térmica
- b.** De imagen térmica no-radiométrica (inspección cualitativa)
- c.** De imagen térmica y radiométrica (inspección cualitativa y cuantitativa)

Los sistemas de medición radiométrica sin imagen (Fig.1-3), por su costo, son los más accesibles. Sin embargo, debido a que no cuentan con una imagen térmica, las inspecciones rutinarias o esporádicas de objetos o sistemas completos, es muy lento y generalmente insuficiente para la mayoría de las aplicaciones. Los problemas comunes que se presentan en sistemas mecánicos, eléctricos/electrónicos, de proceso, entre otros, pueden pasar desapercibidos o no-identificados claramente.



**Fig. 1-3: Radiómetro infrarrojo simple.**

Por otra parte, los sistemas con imagen térmica (Fig.1-4), comúnmente llamados; “visor infrarrojo”, permiten hacer inspecciones cualitativas, y se basan en la comparación de los patrones térmicos, en relación a elementos similares o a patrones típicos de falla conocidos. Generalmente las inspecciones son realizadas bajo las mismas condiciones de operación.



**Fig. 1-4: Visor infrarrojo.**

Cuando el registro de temperatura es necesario para determinar la severidad del problema detectado, se requiere comparar temperatura entre elementos o contra criterios definidos previamente, entonces hablamos de termografía infrarroja cuantitativa. Comúnmente, estos instrumentos son llamados “cámaras termográficas infrarrojas”, (Fig. 1-5).



**Fig. 1-5: Cámara termográfica.**

## 1.4 Teoría básica

### 1.4.1 Energía térmica

Se le denomina energía térmica a la *energía liberada en forma de calor*, obtenida de la naturaleza, mediante la combustión de algún combustible fósil (petróleo, gas natural o carbón), mediante energía eléctrica por efecto Joule, por rozamiento, por un proceso de fisión nuclear o como residuo de otros procesos mecánicos o químicos.

### 1.4.2 Calor

Sucede cuando la energía térmica fluye de un cuerpo a otro, siempre de uno de mayor temperatura (mayor energía térmica) a otro de menor temperatura (menor energía térmica), conforme a la segunda ley de la termodinámica, y es considerada como una energía en tránsito.

Debido a que la energía no se crea ni se destruye solo se transforma (según la 1ª ley de la termodinámica) la energía fluye de un lado a otro transformándose. Cuando esta energía deja de fluir se dice que se ha alcanzado el equilibrio térmico.

### 1.4.3 Transferencia de calor

Se deben conocer los principios y conceptos básicos de la teoría de transferencia de calor: *conducción, convección y radiación* y las variables que los afectan o modifican.

- ☞ **Conducción:** Es el proceso por el cual el calor fluye de una región de alta temperatura a una región de baja temperatura a través de un medio (líquido, sólido o gas) o en diferentes medios en contacto físico directo.
- ☞ **Convección:** Es el método primario por el cual el calor se mueve a través de un fluido, y se da entre líquido-gas, gas-sólido, líquido-sólido, siempre y cuando exista un gradiente de temperatura. Difiere de la conducción en el sentido de que el “fluido” no solamente transfiere el calor por contacto si no por el desplazamiento entre sus propias moléculas, es decir se revuelven internamente sus zonas de alta y baja temperatura.

☞ **Radiación:** Difiere de los otros dos procesos de transferencia de calor ya que conducción y convección requieren de una diferencia de temperatura y una presencia de material. La radiación térmica es la radiación electromagnética emitida por un objeto como resultado de su temperatura y no requiere presencia de material y es estrictamente un fenómeno de superficie. La radiación térmica es el modo de transferencia de calor mas interesante, dada la forma en que se pueden “observar” los fenómenos térmicos.

Un objeto puede reaccionar a la radiación (calor) de tres maneras diferentes:

- **Transmisión:** La radiación pasa a través del objeto sin reacción alguna.
- **Reflexión:** La radiación rebota en la superficie y en este caso, reacciona con el objeto.
- **Absorción:** El objeto absorbe la energía y produce efecto sobre este.

Algo importante de considerar es que los instrumentos de imágenes térmicas (termógrafos) **NO** miden temperaturas, lo que miden los equipos infrarrojos es energía térmica radiada y convierten esta información en valores de temperaturas.

La emitancia y reflectancia, el ángulo de visión entre detector-objeto, la atmósfera, son otros factores que afectan la radiación infrarroja y cambian las condiciones de registro.

La inspección termográfica parece en primera instancia, una actividad simple. Se le ha hecho ver como una actividad simple: encender la cámara, apuntar y medir. Lo anterior no es así de fácil. El desconocimiento de los múltiples factores que afectan la transferencia de calor y la radiación infrarroja, lleva a la captura de imágenes de poca calidad, con información pobre o incorrecta, errores de interpretación de los patrones térmicos y del registro mismo de los valores de temperatura en los objetos o elementos de interés.

#### **1.4.4 Emisividad**

La emisividad ( $\epsilon$ ), es la relación de la radiación emitida por un cuerpo negro a cierta temperatura y la radiación emitida por el objeto bajo análisis a la misma temperatura.

Así la emisividad se expresa como:

$$\text{Emisividad} = \frac{\text{Radiación emitida por un objeto a temperatura T}}{\text{Radiación emitida por un Cuerpo Negro a temperatura T}}$$

La emisividad es por lo tanto una expresión de la capacidad de un objeto a emitir energía infrarroja.

En simples palabras este factor explica que tan bien un objeto radia energía infrarroja; un buen radiador (objetos fácilmente vistos en la cámara) tiene una emisividad, cercana a la unidad ( $\epsilon \approx 1$ ). Contrario a los malos radiadores (objetos no fáciles de ver por la cámara), poseen una emisividad ( $\epsilon$ ) cercana a cero ( $\epsilon \approx 0$ ).

La emisividad depende de varios factores, aquí se listan los más importantes, de acuerdo a su orden de importancia:

- Tipo de material
- Acabado de la superficie del material ( pulida , oxidada)
- Geometría de la superficie (efectos de cavidad, etc.)

La emisividad puede también cambiar por otras razones, menos comunes en situaciones de medición, tales como:

- Niveles de temperatura del material
- Longitudes de onda (IR de onda corta y onda larga).

#### **1.4.4.1 Valores de emisividad**

Los valores de emisividad varían de un material a otro. Los metales con una superficie áspera u oxidada tienen una mayor emisividad que una superficie pulida.

A continuación se detallan algunos ejemplos:

<b>MATERIAL</b>	<b>EMISIVIDAD</b>
Acero brillante	0.18
Acero oxidado	0.85
Latón brillante	0.10
Latón oxidado	0.61
Aluminio brillante	0.05
Aluminio oxidado	0.30
Cemento	0.90
Asfalto	0.90
Ladrillo rojo	0.93
Grafito	0.85

**TABLA 1-1: Valores de emisividad.**

Ver anexos 1 para una referencia más amplia de las emisividades de diferentes materiales

Existe una relación entre la emisividad y la reflectividad de un objeto, para un cuerpo opaco y para efectos prácticos esta relación se establece así:

$$\mathbf{EMISIVIDAD + REFLECTIVIDAD = 1.0}$$

Así mismo un material altamente reflectante es un pobre emisor de energía infrarroja y por lo tanto tiene un valor de emisividad bajo.

## **1.5 Instrumentación**

El término de radiación se refiere a la emisión de energía de una superficie. Los detectores infrarrojos - *cámaras termográficas* - son sistemas de no contacto, que son sensibles a la radiación que emana de la superficie y esta energía a su vez depende de la temperatura de la superficie y sus características.

Por otra parte, conociendo la respuesta espectral del detector, se puede saber cual es su señal eléctrica de salida, que al ser amplificada, genera una imagen visible. Matemáticamente se puede determinar lo anterior y la ley de Steffan-Boltzman describe el



total de máxima radiación que es liberada por una superficie, donde se considera que los objetivos de medición y el fondo son objetos negros perfectos.

La ley de Steffan-Boltzmann establece el potencial emisor de una superficie real, y la cual es menor que el de un cuerpo negro a la misma temperatura absoluta (T) y está dada por:

$$E = \epsilon \cdot \sigma \cdot T_e^4$$

Donde  $\epsilon$  es una propiedad radiante de la superficie denominada *emisividad*. Con valores en el rango  $0 \leq \epsilon \leq 1$ , y la cual depende del tipo de material y la condición de su superficie como ya se estableció en la tabla 1-1 en el numeral anterior. La constante de Steffan-Boltzmann ( $\sigma$ ) viene dada por:

$$\sigma = \frac{2\pi^5 k^4}{15c^2 h^3} = 5.6704 \cdot 10^{-8} \frac{W}{m^2 \cdot K^4}$$

Los detectores infrarrojos, de las cámaras termográficas, solamente censan la energía infrarroja en una pequeña porción del espectro electromagnético (Fig.1-6) y debido a que la radiación se caracteriza por su longitud de onda, es muy importante conocer el material bajo estudio y los factores que afectan su radiación.

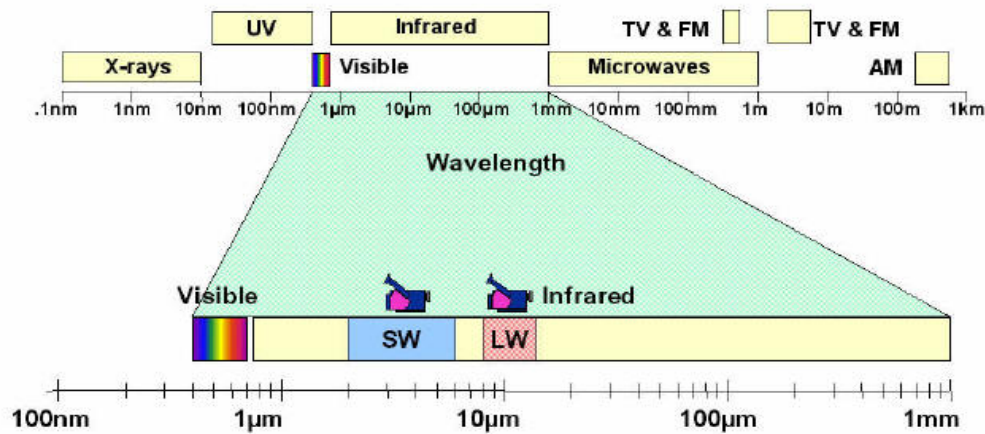


Fig. 1-6: Espectro electromagnético.

Las bandas espectrales conocidas son: *corta* (1.1-2.5μ), *media* (2.5-7.0μ), *larga* (7-15μ) y *muy larga* (arriba de 15μ). En el pasado, se conocía a la onda media, como onda corta, y por esa razón aún comercialmente, se definen dos tipos de cámaras termográficas: onda

corta (SW) y onda larga (LW). Es importante saber, que no todas las cámaras son adecuadas, para realizar cualquier inspección infrarroja.

## 1.6 Cálculo de emisividad

En un principio las cámaras termográficas dan un valor de temperatura para cada punto, sin tener en cuenta que, para la misma temperatura, dos materiales pueden irradiar energía infrarroja con intensidades muy diferentes.

Un ejemplo muy gráfico, es una taza metálica con una cinta para aislar negra que están a la misma temperatura, sin embargo la cinta y el metal de la taza emiten energía infrarroja con intensidades muy diferentes (ver Fig.1-7).

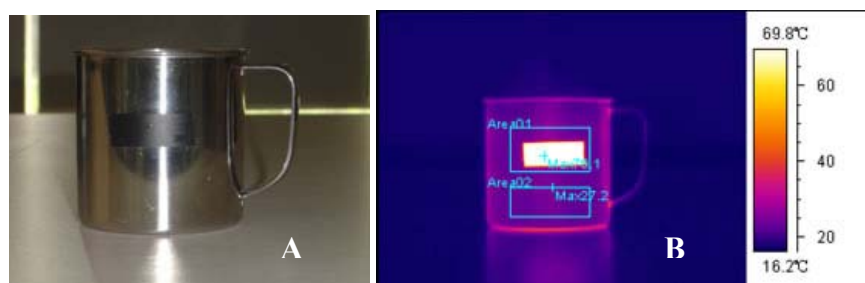


Fig. 1-7: A) taza metálica con cinta adhesiva; B) vista con imagen termográfica.

Aunque físicamente se encuentran a la misma temperatura, el termograma los presenta con temperaturas diferentes, esto se debe a la diferente emisividad entre el metal y la cinta adhesiva.

Todos los instrumentos infrarrojos (como las cámaras termográficas), permiten elegir dentro de una amplia gama de emisividades, la más adecuada para nuestra medición. Por ello es importante conocer los factores que cambian esta característica del material y como es que lo afectan, para obtener lecturas de temperaturas reales.

Para conocer la emisividad del objeto en estudio, lo único que se necesita es una emisividad conocida para ser usada como referencia. En estos casos se utiliza como referencia una cinta para aislar cuya emisividad es de **0.95**, luego se sigue una serie de pasos necesarios para determinar la emisividad del objeto bajo estudio.

Estos pasos son:

- 1) Colocar una cinta negra ( $\epsilon \approx 0.95$ ) sobre el objeto de emisividad desconocida, considerando que el equilibrio térmico se logra esperando unos minutos, que es cuando la cinta adquiere la misma temperatura del objeto.
- 2) Antes de medir la temperatura de la cinta se recomienda calibrar el equipo desde su menú interno.
- 3) Medir la temperatura de la cinta. Ajustando la emisividad del termograma a 0.95, tomar la lectura del valor de temperatura detectado.
- 4) La lectura anterior puede etiquetarse como un punto A, con un valor de emisividad y temperatura conocidos. Un segundo punto por default será B, al cual se le conoce la temperatura debido a que la cinta ha tomado la temperatura del objeto.
- 5) Apuntando el instrumento al objeto y ubicando el punto B con el puntero de la pantalla del equipo de termografía, se ajusta la emisividad del objeto hasta obtener el valor de temperatura en el numeral 3.

En sistemas eléctricos se recomienda por seguridad tomar muestras del material del que se requiere conocer su emisividad y hacerle la prueba, es decir tomar un material similar y hacerle la prueba sin que esté en operación, es muy importante considerar esta información para tener lecturas más acertadas de temperaturas, en la mayoría de los casos cuando la temperatura aumenta la emisividad también.

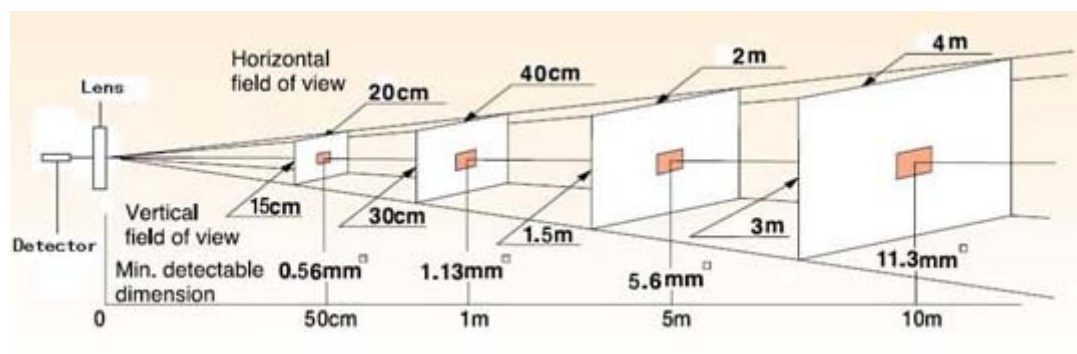
## **1.7 Resolución y óptica**

La resolución visual ó espacial afecta la claridad con la que podemos ver los componentes o equipos bajo estudio. Frecuentemente, cuando se diagnostica un problema, se debe distinguir la fuente real del problema, entre dos o más posibles fuentes, localizadas, muy cerca una de otra. Mientras más claro se pueda ver cada componente individual, se logra distinguir más claramente la fuente del problema.

Es sinónimo de resolución, la fineza o distancia mínima entre elementos que el detector infrarrojo puede observar. *A mayor resolución, mejor imagen* y esto depende de varios factores, como el diseño mismo del detector, el número de píxeles que es capaz de generar en la imagen, y desde luego, la calidad de la óptica utilizada juega un papel muy importante.

Se deben usar los lentes apropiados para la aplicación. Es una buena idea, además de contar con lente estándar equipado con la cámara, contar con lentes gran angular, lente macro y telefoto. Se debe conocer la distancia mínima de enfoque del equipo, en relación a cada lente. También de acuerdo al lente utilizado, es modificada la relación objeto-distancia. Siempre se debe utilizar una relación que permita ver el objeto lo más grande posible para distinguir los más finos detalles.

La resolución espacial se define como la relación entre el tamaño del sensor y la distancia entre las lentes y el sensor. Cuanto más baja sea la resolución espacial a más distancia se podrá utilizar la cámara (o, para la misma distancia, se podrán visualizar objetos más pequeños) ver Fig. 1-8.



*Fig. 1-8: relación entre el tamaño de los objetos y la distancia a la cámara.*

También las restricciones de espacio juegan un papel importante en la selección de los lentes. En un centro de control de motores (CCM), generalmente el espacio es muy reducido y el uso de un lente gran angular, nos permite seguir teniendo una buena perspectiva de los elementos del lugar.

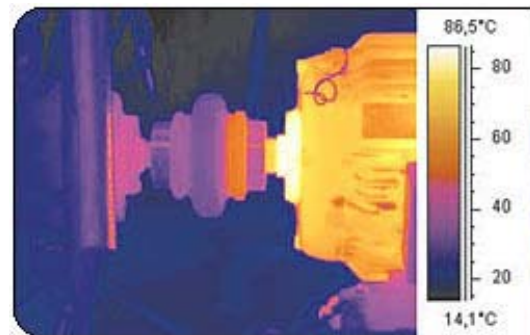
Cada lente debe ser calibrada en forma particular a la cámara termográfica. Se debe tener presente que al adquirir un nuevo lente, la cámara deberá ser enviada al fabricante para que realice la calibración de ambos.

## 1.8 Rango de temperatura y sensibilidad térmica

Los problemas pueden pasar desapercibidos por el termografista, si no hace una selección apropiada de los rangos de temperatura y la sensibilidad o ganancia de la cámara. Los rangos deben ser ajustados de modo que la imagen contenga la información deseada (ver Fig. 1-9). Debido a las variaciones de temperatura del equipo inspeccionado, se requiere hacer el ajuste de rango y sensibilidad térmica, muy frecuentemente. Los equipos termográficos modernos, fijan automáticamente ambos controles, sin embargo, estos, no siempre son los mejores para cada estudio. El termografista experimentado, debe optimizar la información de la imagen, a través de hacer los ajustes de forma manual.

Por otra parte, los ajustes de rango y sensibilidad realizados manualmente no podrán ser usados para todas las inspecciones. Es imperativo re-ajustarlos continuamente para generar siempre la mejor imagen y con la información deseada.

**Fig 1-9: Un rango de temperatura adecuado permite detectar con mayor claridad problemas como desalineamiento.**



## 1.9 Paleta de colores

La paleta de colores es una serie de presentaciones, que la cámara termografica permite seleccionar y poder observar las imágenes termográficas (ver fig.1-10). Esta varía de acuerdo al tipo de cámara termográfica, pero las más usuales son:

- ☞ Arco iris,
- ☞ Ironbow (tonos de acero)
- ☞ Escala de grises (monocromático).

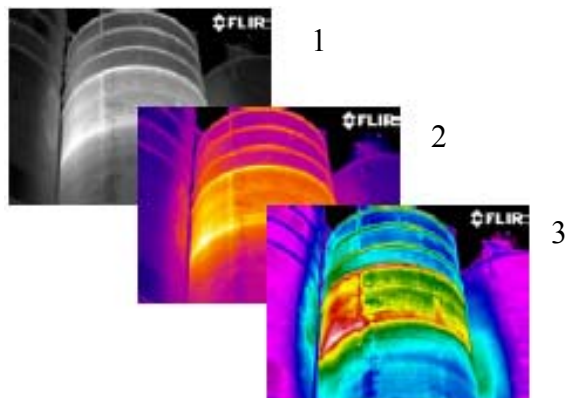


Fig.1-10: Paleta de colores, escala de grises (1), tonalidades de acero (2), arco iris (3)

La selección de una, de las presentaciones que ofrece la paleta de colores depende de la apreciación del termografista, y con la cual este crea más comprensible el comportamiento termográfico del objeto a analizar.

## **1.10 Perspectiva**

El uso de una perspectiva adecuada es desde luego muy conveniente, pero es mucho más crítica para el diagnóstico. Una vez identificado un problema, este debe ser revisado desde diversas perspectivas para obtener más información, y para confirmar que el diagnóstico sea correcto. Existen diversas causas, por la que un problema aparece en la imagen, pero al observarlo desde otra perspectiva, desaparece. Por ejemplo, un reflejo solar en una conexión eléctrica de un transformador en intemperie. Un problema se debe observar no solo de frente, sino también de lado, por arriba y debajo de ser posible. A menudo, se tiene que colocar la cámara termográfica, arriba de la cabeza, o cerca del piso, o en áreas confinadas. Tener una pantalla giratoria o externa es una buena idea, para facilitar el trabajo.

## **1.11 Puntos fríos.**

En las inspecciones no siempre se buscan “puntos calientes”, en ocasiones, las zonas aparentemente “frías” indican un problema o mal funcionamiento. Esto puede encontrarse en el sistema de enfriamiento de un transformador con aceite, al encontrarse bloqueado parcialmente alguno de los radiadores. El problema se detecta como una zona fría (Fig.1-11).

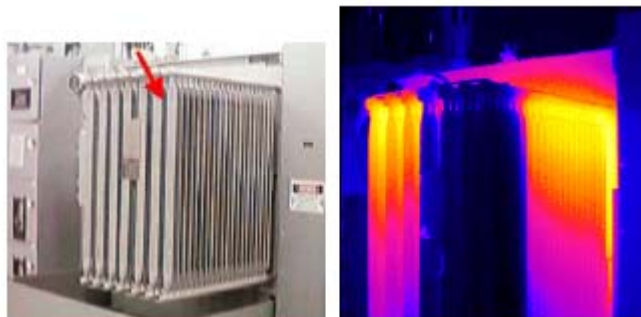


Fig. 1-11: Sección bloqueada de radiador de enfriamiento de transformador con aceite.

## 1.12 Tabla de clasificación de fallas eléctricas

Existe una tabla de clasificación de fallas eléctricas según NETA (national electric), la cual es un buen parámetro para identificar la relevancia de la falla y la acción que se recomienda seguir (ver tabla 1.2).

**OA: Temperatura sobre ambiente**

**OA: Temperatura sobre similar**

Nivel	$\Delta$ Temperatura	Clasificación	Acción
1	1°C-10°C O/A ó 1°C a 3°C O/S	Relevancia LEVE	Ver en próximo mantenimiento
2	11°C-20°C O/A ó 4°C a 15°C O/S	Relevancia GRAVE	Darle seguimiento a falla
3	21°C-40°C O/A ó > 15°C O/S	Relevancia CRITICA	Reparar tan pronto como sea posible
4	>40°C O/A ó > 15°C O/S	Relevancia MUY CRITICA	REPARAR INMEDIATAMENTE

Tabla 1-2: Tabla de clasificación de niveles de falla según NETA.

## 1.13 Reportes

La elaboración de los reportes de inspección, es lenta y laboriosa. Se debe establecer claramente el alcance del reporte según el tipo de inspección infrarroja, incluyendo la información que debe ser incluida. Se debe evitar dedicar demasiado tiempo en la elaboración de los reportes. El tiempo que se dedica a la elaboración del reporte, puede ser tiempo vital requerido para las inspecciones de campo y para la detección oportuna de problemas potenciales.

Los reportes pueden ser cualitativos, o cualitativos/cuantitativos. En la mayoría de las inspecciones en plantas industriales, un reporte cualitativo es suficiente. El reporte debe presentarse en un lapso no mayor a cinco días. La información que se debe incluir en cada reporte es:

- ☞ Sumario ejecutivo (listado de máquinas que se inspeccionaron).
- ☞ Sumario de excepciones. Una excepción, se conoce como un elemento operando fuera de su condición normal.
- ☞ Ubicación de lugar de inspección, fecha y hora.
- ☞ Responsable. Indicando los niveles de certificación que tenga el individuo.
- ☞ Equipo usado y fecha de calibración, incluyendo accesorios usados, como lentes adicionales, filtros, grabadoras de video, cámaras fotográficas, etc.
- ☞ Procedimiento de prueba
- ☞ Las técnicas de análisis. Cualitativas o cuantitativas.
- ☞ Datos. Toda la información en termogramas y valores medidos, registros de emisividad. En algunos casos; la temperatura ambiente, humedad, velocidad de viento, entre otros.
- ☞ Resultados y recomendaciones.

El termografista, no podrá hacer recomendaciones definitivas, a menos que cuente con las certificaciones apropiadas. Un termografista con Nivel I, no podrá hacer registros y recomendaciones definitivas relacionadas a mediciones de temperatura en la superficie inspeccionada. Únicamente un termografista Nivel II podrá hacer estas recomendaciones.

En resumen, un reporte debe contener la información necesaria, precisa y suficiente. Es un error dedicar tiempo a la elaboración de informes con información excesiva o intrascendente. En la mayoría de los casos; “una buena termografía dice más que mil palabras”, ver Fig. 1-12.



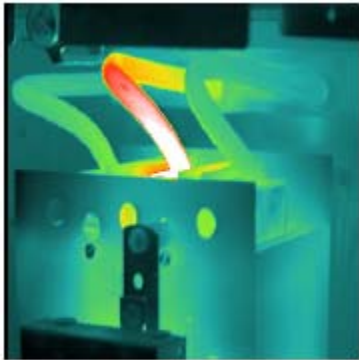


Fig. 1-12: Una buena imagen dice más que mil palabras.

## 1.14 Aplicaciones

### 1.14.1 Aplicaciones eléctricas

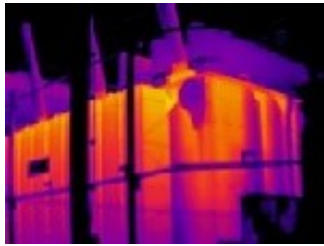
Ningún sistema eléctrico tiene una eficiencia de un cien por ciento. Siempre hay una pequeña cantidad de energía que se transforma en calor debido al paso de la corriente eléctrica. El tiempo, cargas elevadas o fluctuantes, vibraciones, fatiga de materiales, condiciones ambientales, etc. provocan que tanto los componentes como las superficies de contacto se vayan deteriorando, y por tanto aumentando la resistencia eléctrica.

Este aumento de resistencia lleva consigo inevitablemente un aumento de la temperatura del componente que en ocasiones puede producir problemas eléctricos como cortocircuitos o fallos en la alimentación a otros sistemas, pero además puede derivar en otros riesgos como incendios o daños personales.

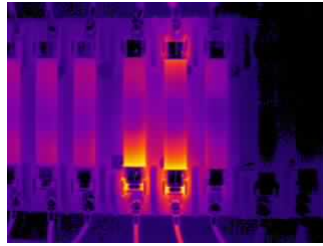
Para poder detectar este incremento de temperatura sin modificar las condiciones de trabajo, será fundamental poder adelantarse a la avería y de esta manera evitar un posible desastre futuro. Es aquí donde la termografía infrarroja se convierte en un instrumento eficaz en el mantenimiento predictivo y preventivo ya que de una manera rápida y visual el termógrafo podrá determinar el estado de la instalación eléctrica así como el de los componentes que la forman.

Algunas de las aplicaciones de la termografía en el campo eléctrico son

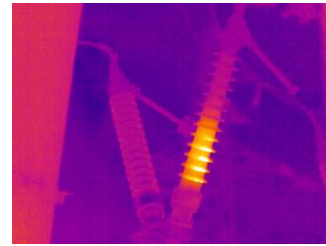
- ☞ Estado de conexiones, bornes y aisladores.
- ☞ Estudio e histórico de transformadores
- ☞ Estado de bobinados de motores / generadores, Armonicos, Inducciones,
- ☞ Desequilibrio de fases, etc...



Estudios térmicos de transformadores



Estado de conexiones y fusibles



Estado de aisladores eléctricos

Fig. 1-13: Imágenes térmicas en aplicaciones eléctricas.

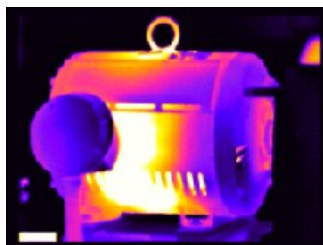
### 1.14.2 Aplicaciones mecánicas

La temperatura en los sistemas mecánicos es de vital importancia, y viene definida por todos los fabricantes de máquinas y herramienta. Rozamientos, fricciones, desalineamiento, etc. pueden producir elevadas temperaturas que acorten la vida útil de las máquinas y sistemas de transmisión, o incluso problemas más serios como gripajes o deformación de materiales.

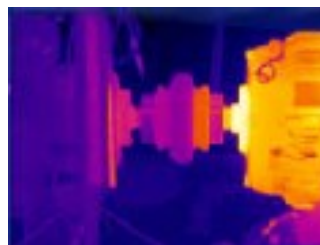
Gracias a la termografía podemos reducir los costos de mantenimiento y alargar la disponibilidad de las máquinas. Ya que esta técnica permite estudiar las temperaturas de las diferentes partes de un sistema mecánico sin tener que detener el proceso, es decir con todos los sistemas en movimiento y a plena carga.

Las principales aplicaciones de la termografía en sistemas mecánicos son:

- ☞ Análisis de motores y generadores.
- ☞ Análisis de rodamientos y poleas.
- ☞ Diagnóstico de estado de cojinetes.
- ☞ Diagnóstico en sistemas de transmisión.
- ☞ Desalineamientos.
- ☞ Estado de los lubricantes.
- ☞ Inspección de soldaduras.



Estudio térmico de máquinas



Análisis de alineamientos

Fig. 1-14: Imágenes térmicas en aplicaciones mecánicas.

### 1.14.3 Aplicaciones en procesos

Los equipos de termografía funcionan recogiendo la energía infrarroja emitida por la superficie de los objetos. La condición “normal” de un objeto será aquella que muestre un patrón de temperatura apropiado para el objeto en cuestión (Fig 1-15).

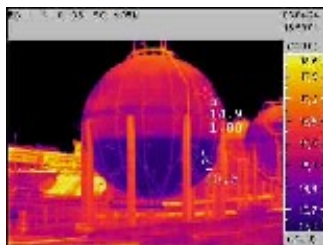
Cambios en las propiedades físicas como son la corrosión, grietas, erosiones, estrechamientos, fugas, bloqueos, etc. causan variaciones detectables en los patrones de energía infrarroja. Podemos aplicar la termografía para detectar anomalías en procesos industriales donde pueden darse algunas de las mencionadas anteriormente.

Algunos casos típicos para los que se aplica la termografía son:

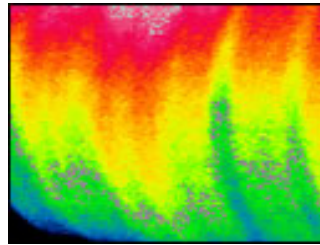
- ☞ Estado y estudio de válvulas.
- ☞ Detección de tuberías subterráneas.
- ☞ Nivel de líquido de tanques (y sólido).
- ☞ Estudio de refractarios.
- ☞ Estudio de pérdidas térmicas.
- ☞ Fugas de vapor.
- ☞ Pérdidas de vacío.



Perdidas en válvulas



Tanque de gas



Procesos de fabricación de papel

Fig. 1-15: Imágenes térmicas en aplicaciones en procesos.

### 1.15 Ventajas

Las ventajas que ofrece la termografía infrarroja son:

- ☞ Método de análisis sin detención de procesos productivos, ahorra gastos.
- ☞ Baja peligrosidad para el operario por evitar la necesidad de contacto con el equipo.
- ☞ Determinación exacta de puntos deficientes en una línea de proceso.
- ☞ Reduce el tiempo de reparación por la localización precisa de la Falla.
- ☞ Facilita informes muy precisos al personal de mantenimiento.

☞ Ayuda al seguimiento de las reparaciones previas.

## **1.16 Fundamentos para un programa de inspección infrarroja de calidad**

Los resultados, que pueden ser impresionantes—especialmente en una planta que no ha tenido un programa activo de termografía—nunca ascienden al potencial total. A largo plazo es esencial establecer las rutas para que todo equipo sea inspeccionado en una frecuencia apropiada.

Se debe comenzar con las listas existentes de equipos, aunque no estén actualizadas. Estos pueden estar probablemente en un CMMS (Sistema Computarizado de Administración de Mantenimiento) o en un inventario de equipo para otra tecnología de monitoreo de condición. Se debe eliminar de la lista cualquier equipo en donde la termografía ofrece pequeñas promesas o donde otras tecnologías son muy superiores. Se debe enfocar en el equipo que crea un cuello de botella en la producción o donde la seguridad sea preocupante o en cualquier otro que ha tenido fallas costosas en el pasado. Se debe completar la lista por información del piso, de los operarios, de la administración y de cualquier otra persona con conocimiento e interés.

De ser posible, crear registros en una base de datos en formato electrónico, agrupando el equipo escogido en rutas preliminares por área y función eso puede ser inspeccionado en bloques de tiempo de dos o tres horas cada uno.

Para un programa exitoso, es esencial enlistar y priorizar todo equipo para ser inspeccionado. Una base de datos electrónica puede ser clasificada según varios parámetros para crear, y para modificar, las rutas infrarrojas de la inspección y frecuencias.

El primer ciclo de inspección puede ir lentamente mientras se toma el tiempo en localizar el equipo, actualizar el listado, tratar con asuntos de acceso, etc. Documentar todo el equipo con imágenes visuales, digitales y de gran calidad al mismo tiempo. Esto demostrará una referencia inapreciable más tarde. Todo esto toma tiempo pero, resultará en una inversión sabia y una base sólida para el trabajo posterior.

Si la termografía es nueva en la planta, los primeros ciclos de inspección rendirán probablemente muchos hallazgos. Esto será definitivamente verdad si se informan todas las

anormalidades a pesar de su temperatura. Al hacerlo de otro modo, se falla en documentar la condición verdadera del sistema y tiene como resultado una asignación pobre de recursos futuros al programa. Sin embargo, no hay que permitir que la organización se impresione por estas conclusiones, se debe priorizar y reparar primero los que son lucrativos y fáciles de tratar. Los otros pueden esperar, pero deben ser planificados para inspecciones más frecuentes las inspecciones subsecuentes deben ser más minuciosas y efectivas.

Después de aproximadamente tres ciclos puede ser apropiado reorganizar las rutas para que sean más eficientes. Las tendencias deben comenzar a revelarse y el uso de múltiples tecnologías aumentará mucho los resultados.

Es conveniente crear nuevas rutas y agregar equipos en el programa según el tiempo y los recursos permitan. Con el tiempo se acumulan y analizan los datos para crear los informes para la administración. Si el mantenimiento trabaja bien, se encontrarán menos y menos problemas. Por ello se debe tener documentado todos los casos en los cuales la termografía permitió detectar posibles fallas en los equipos, evitar daños en estos y paros de producción.

El siguiente diagrama de flujo es un ejemplo de cómo la termografía puede encajar lógicamente en un programa general de mantenimiento que incluye otras tecnologías de mantenimiento predictivo.

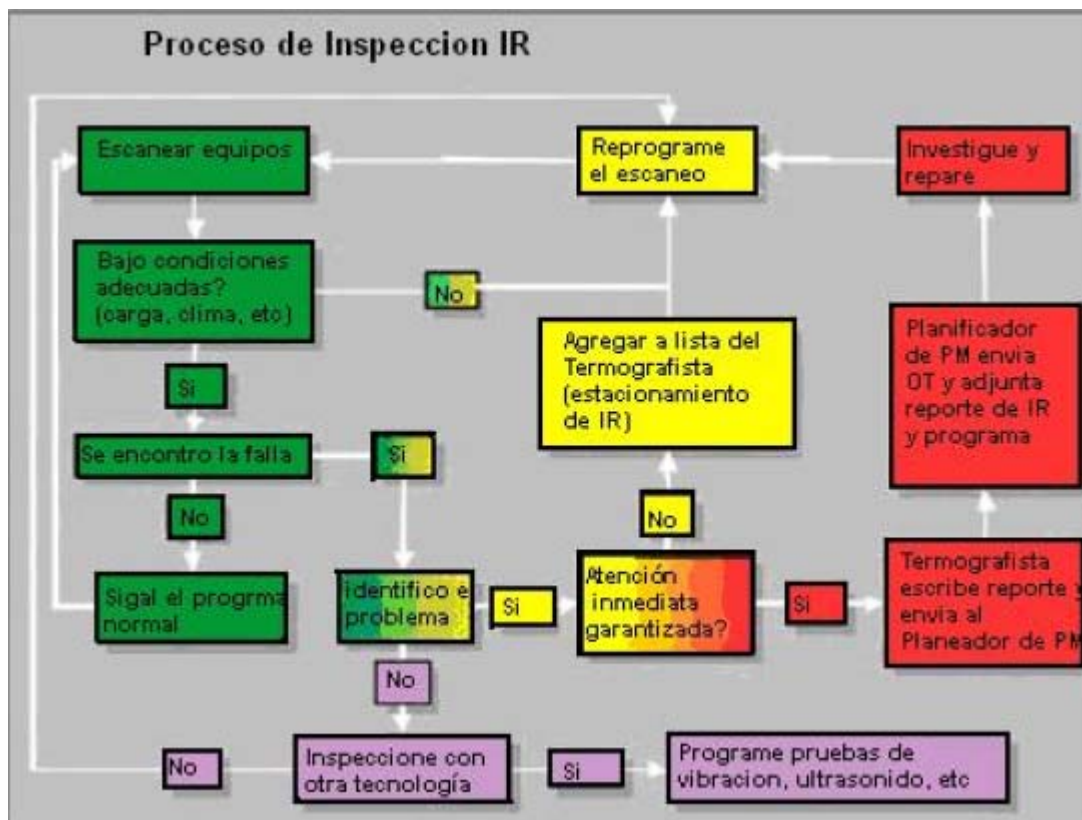


Fig. 1-16: Diagrama de flujo de análisis termográfico en un programa de mantenimiento.

Un error común es inspeccionar una vez al año. Las frecuencias óptimas para la inspección deben ser determinadas por las necesidades de los activos del equipo. Algunas circunstancias (por el uso, carga pesada o un mantenimiento pobre), pueden sugerir una frecuencia mayor de la inspección.



Fig. 1-17: Análisis de equipo eléctrico.

Crear el análisis formal de rutas y frecuencias se utiliza también como la manera más eficiente y efectiva de utilizar la termografía para el monitoreo basado en condición del equipo eléctrico.

Las frecuencias típicas de la inspección termográfica se basan en varios factores. El factor principal es la seguridad, la criticalidad del equipo, el gasto de una falla, y de la frecuencia con la cuál los problemas han estado impactando la producción y/o el mantenimiento en el

pasado. Este último es lo suficientemente importante para dedicar más tiempo a investigar las fallas en el pasado, o de manera informal por discusiones con colegas o más formalmente revisando los registros de la planta.

A largo plazo, sin embargo, son los resultados de las inspecciones las que manejarán los cambios en las frecuencias. Cuando menos problemas se encuentran, el resultado natural de un programa planeado de mantenimiento basado en monitoreo de condición, las frecuencias de la inspección para muchos activos se pueden extender. Es esencial, por lo tanto, para documentar todas las conclusiones y para acumular y analizar estos datos periódicamente. Las frecuencias siguientes, incluso si son irrealmente genéricas, son buenos objetivos a largo plazo.

<b>TIPO DE EQUIPO</b>	<b>FRECUENCIA DE INSPECCION</b>
Subestación de alto voltaje	1 a 3 años
Transformadores	Anualmente
Equipos de distribución eléctricas	4 a 6 meses
Motores grandes	anualmente
Motores pequeños	4 a 6 meses

**Tabla 1-3: frecuencias generales de inspección.**

Además es importante que todo equipo nuevo sea inspeccionado, como parte del proceso de la aceptación así como, especialmente para equipo más grande, para establecer la referencia de los datos térmicos. Muchas plantas ahora mandan rutinariamente a sus termógrafos fuera de la planta para inspeccionar el equipo nuevo antes de ser entregado a la planta por el vendedor. Estas inspecciones "fuera de compra" han probado ser de gran valor en muchos casos, al encontrar deficiencias y problemas antes de que el equipo sea aceptado.

Cuándo las reparaciones o modificaciones son realizadas al equipo, el CMMS (*Computer Maintenance Management Software*) debe poner sobre aviso al termografista para realizar una inspección de seguimiento. Los datos sugieren que las reparaciones son a menudo inadecuadas, por una variedad de razones, de modo que las re-inspecciones son una parte crítica del mantenimiento de calidad.

## **1.17 Responsabilidades del inspector termográfista**

El inspector termográfista, debe conocer las responsabilidades que implica la ejecución de las inspecciones termográficas. Estas responsabilidades, generalmente son descritas en las guías de inspección, que han sido definidas por diversas instituciones internacionales dedicadas a la materia, por ejemplo la ASNT y el Infraspection Institute de los Estados Unidos.

En resumen; en las guías para las inspecciones termográficas, se describe que el termografista, debe tener suficiente conocimiento de los componentes inspeccionados, su construcción y teoría de funcionamiento de los diversos sistemas inspeccionados (eléctricos, mecánicos, aislamientos, etc.), para entender los patrones térmicos de la radiación.

El técnico deberá utilizar la instrumentación infrarroja termográfica con capacidades suficientes para cumplir con los requerimientos de inspección.

En el caso de inspecciones eléctricas, deberá contar con la asistencia de un electricista con licencia, o certificaciones equivalentes, para identificar y descubrir los equipos a inspeccionar. El técnico termografista, nunca deberá realizar ninguna tarea en sistemas eléctricos que normalmente sea realizada por el personal capacitado de planta. No tocará o removerá componentes o equipos que estén bajo la responsabilidad de otras personas calificadas. El termografista, tampoco, realizará mediciones de cargas en sistemas eléctricos energizados, ni tocará ningún equipo, del cual siempre se mantendrá a una distancia segura.

Cumplirá con las normas de seguridad correspondientes a la actividad de inspección que será realizada. Las reglas de seguridad de acuerdo al tipo de inspección, al área de trabajo o proceso, siempre deberán ser observadas por el termografista y nunca deberá realizar ninguna actividad que se considere riesgosa. Se debe recordar que existe áreas con piso irregular, resbaloso, tuberías muy bajas, partes de máquinas en rotación, elementos energizados, grandes alturas, barandales flojos o poco espacio. El exceso de confianza, es un factor que ocasiona la mayoría de los accidentes. Siempre se debe dar aviso que se hará



una inspección y se deberá solicitar los permisos correspondientes para poder ingresar a un área. Preguntar por las medidas de seguridad y hacerse acompañar por personal calificado, que conozca el área debe ser una práctica obligatoria.

El uso de visores mono-oculares, es riesgoso, principalmente en áreas con elementos energizados. Una tendencia natural es cerrar un ojo y observar con el otro, a través del visor. Al caminar se pierde la noción de la distancia. Cuando se inspeccione en áreas energizadas, es recomendado, utilizar un display o monitor externo a la cámara y nunca el visor mono-ocular. Fig. 1-18.



Fig. 1-18: Cámara infrarrojas con visor mono -ocular y con monitor externo.

Finalmente, el desconocimiento o falta de entrenamiento para el uso correcto de las guías de inspección termográfica o la carencia de las mismas, incluyendo las normas de seguridad, puede generar desde enormes fuentes de error de interpretación de los datos adquiridos, hasta un accidente letal para el personal involucrado en las inspecciones termográficas.

## **1.18 Nueve pasos fundamentales para implantar un programa de mantenimiento predictivo basado en inspecciones infrarrojas**

Ninguno de los siguientes nueve pasos deberá ser pasado por alto dentro del programa de mantenimiento predictivo basado en inspecciones infrarrojas:

- 1 ¿Qué inspeccionar?; ¿Cual es el mejor método?; ¿Que pasa si el equipo falla?; ¿Que tan crítico es el equipo?; ¿Cuál es la historia de las fallas?.*

- 2 Hacer un listado de las máquinas a inspeccionar (inventario)
  - ☞ Generar rutas
- 3 Asignar la mejor frecuencia de inspección y prioridades
  - ☞ Llevar gráficos de fallas
  - ☞ Ajustar la frecuencia como sea necesario
- 4 Definir los límites de temperatura
- 5 Realizar las inspecciones
  - ☞ Seleccionar al personal adecuadamente
  - ☞ Asegurarse de obtener datos repetitivos
  - ☞ Documentar las inspecciones
6. Generar una Orden de Trabajo
  - ☞ Los diagnósticos deberán generar una orden de trabajo
  - ☞ Estar seguros que los problemas hayan sido resueltos
  - ☞ Obtener las partes dañadas
7. Re-inspección de todas las reparaciones
  - ☞ ¿Dónde se encontró el problema?
  - ☞ Anotar los materiales que fueron usados
  - ☞ ¿Cuánto tiempo se ocupó en la reparación?
  - ☞ Re-inspeccionar todas las reparaciones en un lapso de 24 a 48 horas.
8. Documentar los ahorros y/o costos evitados
9. Hacer un análisis de causa-raíz
  - ☞ ¿Es un problema de diseño?
  - ☞ ¿Mano de obra deficiente?
  - ☞ ¿Falla del material?

## **2.0 Análisis por ultrasonido**

---

### **2.1 Introducción**

#### **2.1.1 Definición de ultrasonido**

El análisis por Ultrasonido Industrial (UT) se define como un procedimiento de inspección no destructiva de tipo mecánico, que se basa en la impedancia acústica, la que se manifiesta como el producto de la velocidad máxima de propagación del sonido entre la densidad de un material.

El ultrasonido es una vibración mecánica con un rango mayor al audible por el oído humano que se transmite a través de un medio físico y es orientado, registrado y medido en Hertz con ayuda de un aparato creado para ese fin.

Rangos de sonido:

Infrasónica = 1 – 16 Hz

Sónica o audible = 16 Hz a 20 KHz

Ultrasónica = 20 KHz en adelante

El método del ultrasonido en la ingeniería es utilizado para el ensayo de los materiales, es una técnica de ensayo no destructivo (END) y tiene diversas aplicaciones, en especial para conocer el interior de un material o sus componentes según la trayectoria de la propagación de las ondas sonoras, al procesar las señales de las ondas sonoras se conoce el comportamiento de las mismas durante su propagación en el interior de la pieza y que dependen de las discontinuidades del material examinado, lo que permite evaluar aquella discontinuidad acerca de su forma, tamaño, orientación, debido que la discontinuidad opone resistencia (conocida como impedancia acústica) al paso de una onda.

#### **2.1.2 Historia de la inspección por ultrasonido**

La historia del Ultrasonido Industrial como disciplina científica pertenece al siglo XX. En 1924, El Dr. Sokolov desarrolló las primeras técnicas de inspección empleando ondas ultrasónicas.

Posteriormente, durante la Segunda Guerra Mundial, los ingenieros alemanes y soviéticos se dedicaron a desarrollar equipos de inspección ultrasónica para aplicaciones militares. En ese entonces la técnica seguía empleando un emisor y un receptor (técnica de transparencia) en la realización de los ensayos.

En la década de 1940 el Dr. Floyd Firestone logró desarrollar el primer equipo que empleaba un mismo palpador como emisor y receptor, basando su técnica de inspección en la propiedad característica del sonido para reflejarse al alcanzar una interfase acústica.

El perfeccionamiento del instrumento de inspección por ultrasonido se debe principalmente a los investigadores alemanes Josef y Herbert Krautkramer.

Los equipos de ultrasonido que empleamos actualmente permiten detectar discontinuidades superficiales, subsuperficiales e internas, dependiendo del tipo de palpador utilizado y de las frecuencias que se seleccionen dentro de un ámbito de 0.25 hasta 25 MHz.

En el método ultrasónico se utilizan instrumentos que transmiten ondas con ciertos intervalos de frecuencia y se aplican para detectar defectos como poros, fisuras, también para conocer las propiedades básicas de los líquidos y sólidos como la composición, estructura.

El análisis de los materiales mediante ultrasonido se basa en el siguiente principio físico: En movimiento de una onda acústica, la onda es afectada por el medio a través del cual viaja.

### **2.1.3 Aplicaciones del ultrasonido**

- ☞ Detección y caracterización de discontinuidades.
- ☞ Medición de espesores, extensión y grado de corrosión.
- ☞ Determinación de características físicas.
- ☞ Características de enlace entre materiales.

Las aplicaciones son muy amplias y también abarcan la industria metalúrgica, construcciones navales, aeronáuticas, y otras industrias en general; algunos ejemplos de aplicación son:

### **2.1.3.1 Módulo de elasticidad**

El módulo de elasticidad (Young), módulo de cizallamiento, son calculados en función de la longitudinal y la velocidad de onda. Con el uso de técnicas especiales del método de ultrasonido las propiedades referidas de los materiales se pueden medir también a altas temperaturas.

### **2.1.3.2 Nodularidad De La fundición**

Se cuantifica la concentración de grafito en hierro colado y su forma mediante la medición de la velocidad de la onda acústica.

### **2.1.3.3 Anisotropía en sólidos**

Las variaciones de velocidad en el interior de las piezas, la dispersión, y/o la atenuación de ondas a través de diferentes ejes de un sólido pueden usarse para identificar y cuantificar la anisotropía de un material.

### **2.1.3.3 Profundidad de cementación en acero**

Las técnicas del ultrasonido especialmente de onda transversal y de alta frecuencia pueden usarse para medir la profundidad de cementación.

### **2.1.3.4 Medida de temperatura**

La termometría ultrasónica se usa para medir temperaturas muy altas (por ejemplo a 3 000 grados Celsius) monitoreando cambios en la velocidad del sonido.

## **2.1.4 Ventajas y limitaciones del ultrasonido industrial**

### **2.1.4.1 Ventajas del ultrasonido industrial.**

- ☞ Se detectan discontinuidades superficiales y subsuperficiales.
- ☞ Sólo se requiere acceso por un lado del material a inspeccionar.
- ☞ Tiene alta capacidad de penetración y los resultados de prueba son conocidos inmediatamente.

- ☞ Se tiene mayor exactitud al determinar la posición de las discontinuidades internas; estimando sus dimensiones, orientación y naturaleza.
- ☞ Alta sensibilidad para detectar discontinuidades pequeñas.
- ☞ Buena resolución que permite diferenciar dos discontinuidades próximas entre si.
- ☞ No requiere de condiciones especiales de seguridad.

#### **2.1.4.2 Limitaciones del ultrasonido industrial.**

- ☞ Baja velocidad de inspección cuando se emplean métodos manuales.
- ☞ Dificultad para inspeccionar piezas con geometría compleja, espesores muy delgados o de configuración irregular.
- ☞ Dificultad para detectar o evaluar discontinuidades cercanas a la superficie sobre la que se introduce el ultrasonido.
- ☞ Requiere de patrones de calibración y referencia; y generalmente no proporciona un registro permanente.
- ☞ Es afectado por la estructura del material. (tamaño de grano, tipo de material).
- ☞ Se requiere de agente acoplante.
- ☞ Está limitado por la geometría, estructura interna, espesor y acabado superficial de los materiales sujetos a inspección.
- ☞ Localiza mejor aquellas discontinuidades que son perpendiculares al haz de sonido.
- ☞ El equipo puede tener un costo elevado, que depende del nivel de sensibilidad y de sofisticación requerido.
- ☞ El personal debe estar calificado y generalmente requiere de mucho mayor entrenamiento y experiencia para este método que para cualquier otro de los métodos de inspección.
- ☞ La interpretación de las indicaciones requiere de mucho entrenamiento y experiencia de parte del operador.

## **2.2 Principios acústicos**

Para obtener una mejor comprensión de los fenómenos que ocurren en el ensayo no destructivo de ultrasonido, es necesario recordar algunos pocos conceptos físicos básicos.

## 2.2.1 Oscilación

Como punto de partida consideremos el término oscilación y todas sus características relacionadas. Un ejemplo bien conocido de oscilación son los péndulos o las cuerdas de un instrumento musical, cuya característica común de oscilación en ellos es el cambio regular de su valor de estado (por ejemplo posición de una partícula de la masa) o el periódico alcance de una condición instantánea (en un péndulo, por ejemplo, el punto de inversión derecho o izquierdo). Un péndulo puede moverse veloz o lentamente, fuerte o débilmente; dos péndulos idénticos pueden oscilar en el mismo sentido uno con otro.

Los siguientes términos están relacionados con las vibraciones y serán abreviadamente definidos como sigue:

**Oscilación (ciclos):** cambio periódico de la condición o el comportamiento de un cuerpo.

**Período:** tiempo necesario para llevar a cabo una oscilación, por ejemplo el tiempo en que un cuerpo se mueve un ciclo completo relacionado al momento de estados idénticos. Este se designa “t” y es usualmente expresado en segundos (seg.), ver Fig. 2-1.

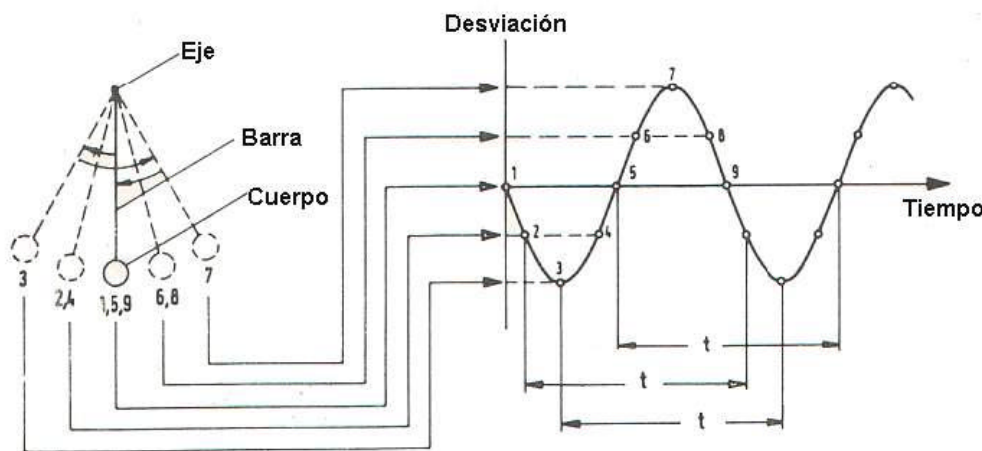


Fig. 2- 1: Oscilación de un péndulo (derecha) y su representación gráfica vs. El tiempo.

**Frecuencia:** Es el inverso del período o el número de oscilaciones (ciclos) por unidad de tiempo (Fig 2-2). La frecuencia se designa con “f” dando la relación:

$$f = \frac{1}{t}$$

La unidad es el “Hertz” (Hz).

1 Hertz (Hz) = 1 ciclo por segundo.

1 Kilohertz (KHz) =  $10^3$  Hz = 1000 ciclos por segundo.

1 Megahertz (MHz) =  $10^6$  Hz = 1 millón de ciclos por segundo.

1 Gigahertz (GHz) =  $10^9$  Hz =  $10^9$  ciclos por segundo.

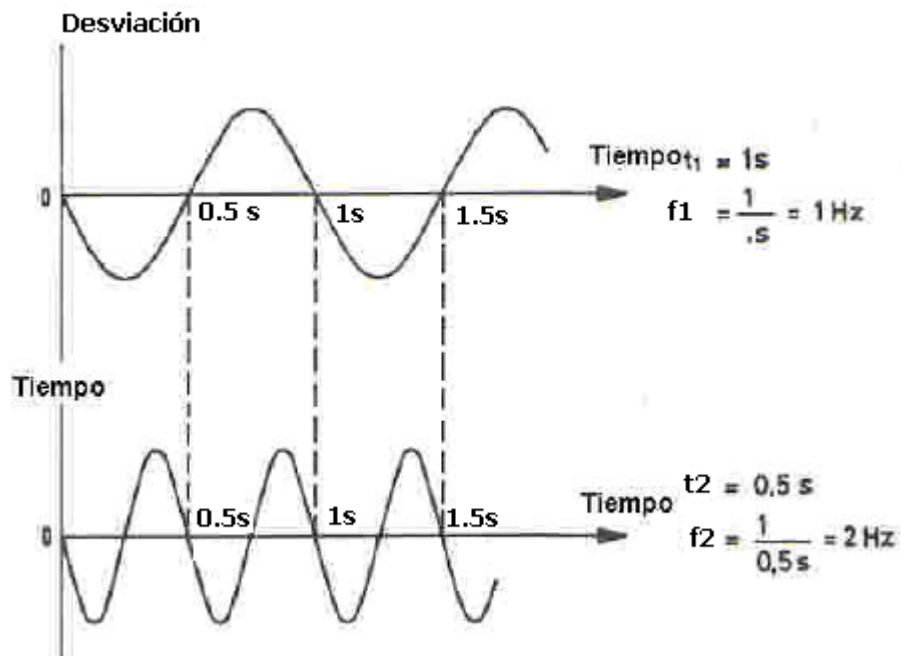


Fig. 2-2: Ejemplo de oscilaciones con diferentes tiempos y frecuencias.

**Amplitud:** Es la máxima desviación del cuerpo oscilante desde la posición de equilibrio (posición cero), ver Fig 2-3.

Si la amplitud (designada por “A”) es constante en el tiempo, la oscilación es desamortiguada; si esta decrece con el tiempo, se la llama oscilación amortiguada, ver Fig.2- 5.



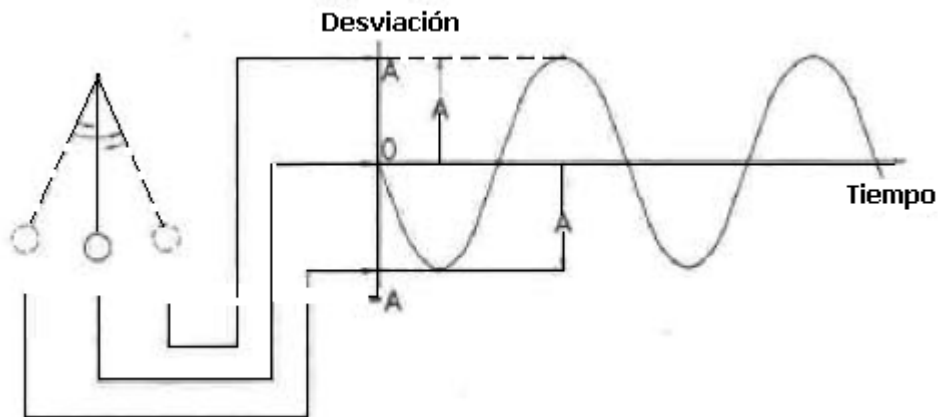


Fig. 2-3: Definición de la amplitud "A" de una oscilación.

**Fase:** Es la condición instantánea en una oscilación: el concepto se aplica principalmente cuando se comparan 2 oscilaciones, de modo que es también llamado diferencias o desplazamiento de fases, ver Fig. 2-4. La diferencia de fase, designada por " $\Delta\phi$ ", es comúnmente dimensionada en grados de ángulo, donde el período " $t$ " corresponde a un ángulo de  $360^\circ$  (círculo).

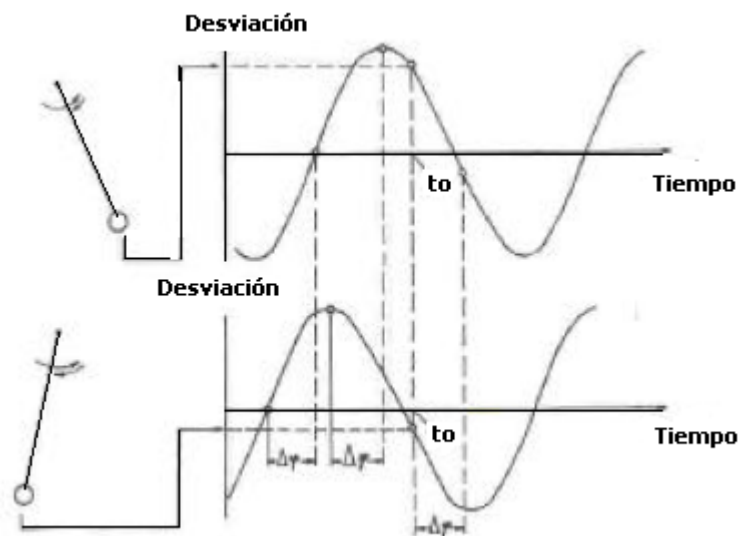


Fig. 2-4: Ejemplo de oscilación con diferencia de fases " $\Delta\phi$ "

**Amortiguación o Atenuación:** Decremento en el tiempo de la amplitud de una oscilación.

Las diferentes razones por lo que sucede esto, se verán más adelante. Ver Fig.2-5.

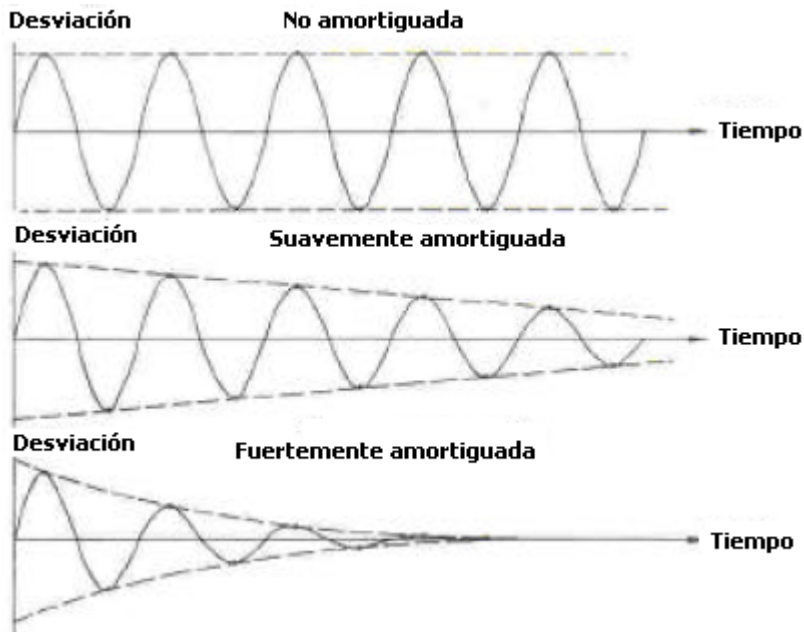


Fig. 2-5: Oscilaciones Amortiguadas y Desamortiguadas.

### 2.2.2 Ondas

Hasta aquí se ha considerado el comportamiento de un cuerpo simple (por ejemplo el péndulo). La misma consideración se puede aplicar ahora aplicada a partículas elementales (átomos y moléculas) de un cuerpo. Aquí deben ser discutidas algunas características de gran importancia para el ensayo ultrasónico debido al gran número y a las fuerzas actuantes entre ellos (átomos y moléculas).

Si varios cuerpos son acoplados entre sí rígidamente y a uno de ellos se lo hace oscilar, todos los otros oscilarán en la misma fase, frecuencia y amplitud; mientras sea desamortiguado, esto puede ser considerado como una entidad, ver Fig.2-6.

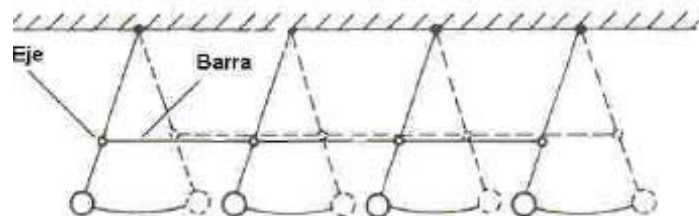
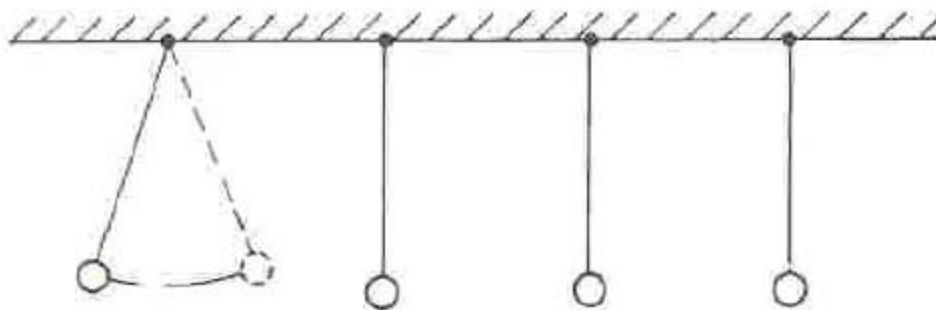


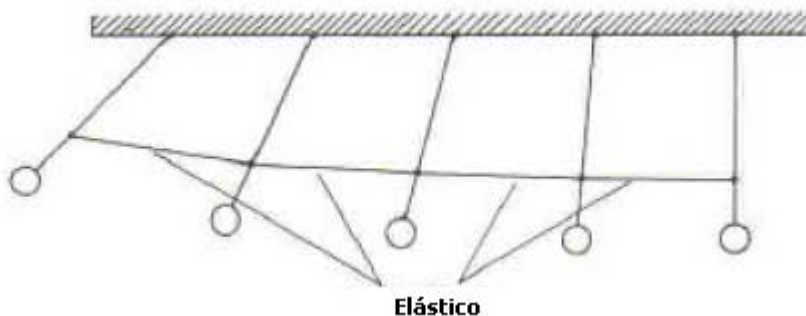
Fig. 2-6: Modelo de acoplamiento rígido.

No obstante, si estos cuerpos no estuvieran unidos uno con otro, los demás permanecerían en reposo si uno de ellos oscilase (Fig. 2-7).



**Fig. 2-7: Modelo sin uniones.**

Cuando hay una unión elástica entre estos cuerpos (por ejemplo varios péndulos unidos por elásticos (o resortes) Fig. 2-8), la oscilación de uno de los cuerpos será gradualmente transmitida al adyacente y así siguiendo. De esta forma se produce una onda. Ver Fig. 2-9.



**Fig. 2-8: Modelo con acoplamiento elástico.**

Las definiciones relacionadas a la ocurrencia y la propagación de ondas son las siguientes:

**Onda:** es la propagación de una oscilación y sucede cuando una partícula oscila transmitiendo su vibración a la adyacente.

Las partículas adyacentes tienen una diferencia de fase constante.

El gráfico de una onda es similar al de una oscilación, pero versus una distancia en lugar del tiempo.

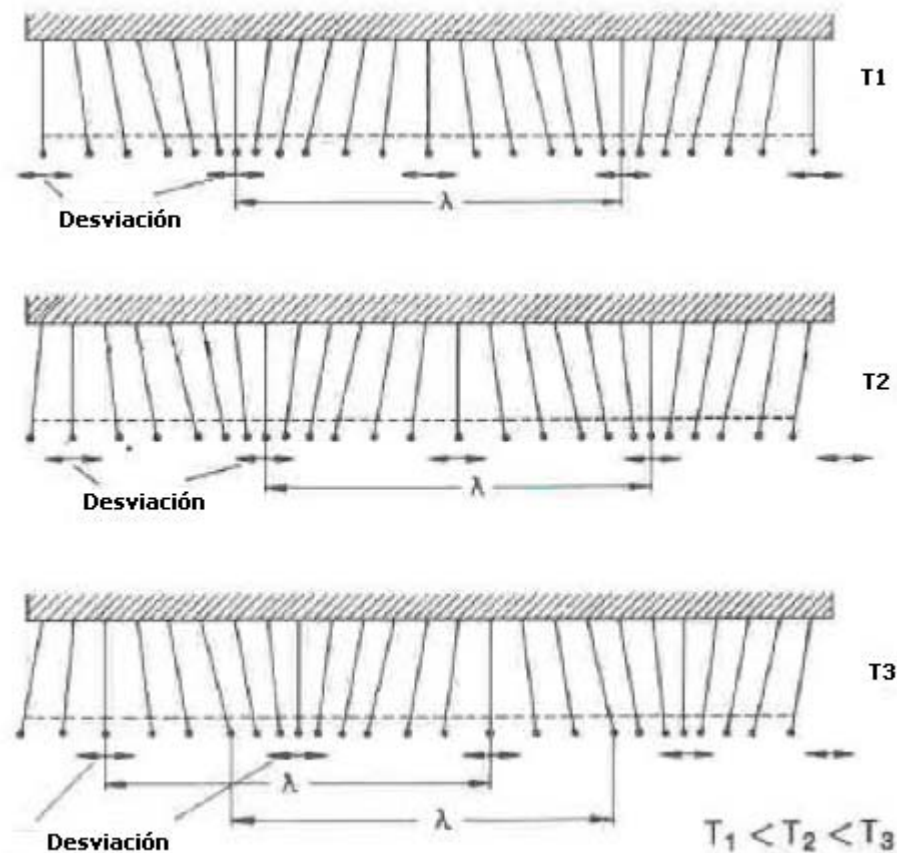


Fig. 2-9: Modelo de una onda (longitudinal) y su propagación.  $\lambda$ : longitud de onda.

**Acoplamiento:** Unión entre dos partículas adyacentes o medio, y es el factor necesario para la ocurrencia y propagación de ondas. Un acoplamiento total (rígido) o el no acoplamiento total nunca ocurre en la naturaleza, esto varía dentro de límites amplios. El acoplamiento es producido por fuerzas atómicas o moleculares elásticas de enlace, por fricción, por gravitación, etc.

**Velocidad de propagación (velocidad sónica):** es la velocidad de propagación de una onda, relacionada a iguales fases, por lo que de allí también es llamada velocidad de fase. Es designada por “c” (en alguna bibliografía también como “v”) y se expresa en cm/s, m/s ó Km/s. La velocidad sónica es una propiedad del material.

**Longitud de onda:** es la distancia entre dos puntos adyacentes de condición de oscilación equivalente o igual fase, mirando en la dirección de propagación. La longitud de onda es

una magnitud muy importante, designada por “ $\lambda$ ”, y cuya relación de aplicabilidad es la siguiente:

$$\lambda = c \times t = \frac{c}{f} \quad ; f = \frac{c}{\lambda} \quad ; c = \lambda \times f \quad (2)$$

### **2.2.3 Tipos de ondas**

La propagación de ondas puede ocurrir en dos direcciones:

- a) en la dirección de oscilación de las partículas
- b) en la dirección perpendicular de oscilación de las mismas.

Existen los siguientes tipos de ondas:

#### **2.2.3.1 Onda longitudinal**

Aquí, la dirección de oscilación de las partículas coincide con la dirección de propagación de la onda como muestra la Fig. 2-9. Como ejemplo, se puede mencionar una onda normal (variación de compresión) en aire. Por esto es también llamada onda de compresión.

#### **2.2.3.2. Onda transversal**

La dirección de oscilación de la partícula es perpendicular a la dirección de propagación de la onda. Un ejemplo obvio, aún cuando no sea correcto en el sentido físico, es el encontrado en ondas en agua (oscilación vertical, propagación horizontal).

### **2.2.4. Sonido**

Consideraremos el capítulo de sonido fuera del amplio campo de las oscilaciones y procesos de ondas y explicaremos esto algo más detallado debido a que es de importancia en el método de ensayo.

El sonido, como se conoce diariamente, se propaga en forma de ondas. En oposición a las ondas magnéticas, calóricas y lumínicas está asociado con la presencia de materia.

En el rango de sonido audible uno puede distinguir:

**Tonos:** esto es determinado por la frecuencia.

**Volumen:** depende de la amplitud de oscilación.

**Timbre:** es determinado por la ocurrencia de varias frecuencias simultáneamente, por las varias amplitudes de una oscilación individual, y por la duración de las diferentes componentes del sonido.

Respecto a la frecuencia (tonos), más allá de las divisiones que puedan ser hechas, se sabe que no todas ellas son audibles para el oído humano. Solamente lo es un cierto rango, con un límite superior e inferior, el cual puede diferir entre individuos y que puede variar con la edad. El límite inferior de audibilidad se halla alrededor de 16 Hz, y el superior alrededor de 20 KHz.

De acuerdo con convenios internacionales, el rango es ahora subdividido como sigue:

**Subsónico:**  $f < 16$  Hz; esto es el rango de vibración debajo del límite de audibilidad. No se escuchará ningún tono, solo se notará presión.

**Sonido audible:**  $16 < f < 20$  Hz, rango de frecuencias de sonido que son audibles por el oído humano.

**Ultrasonido:**  $f > 20$  KHz, estas frecuencias están por encima del límite de escucha humana. Las frecuencias usuales para los ensayos no destructivos son en el rango de 0.5 a 25 MHz. Ver Fig.2-10.

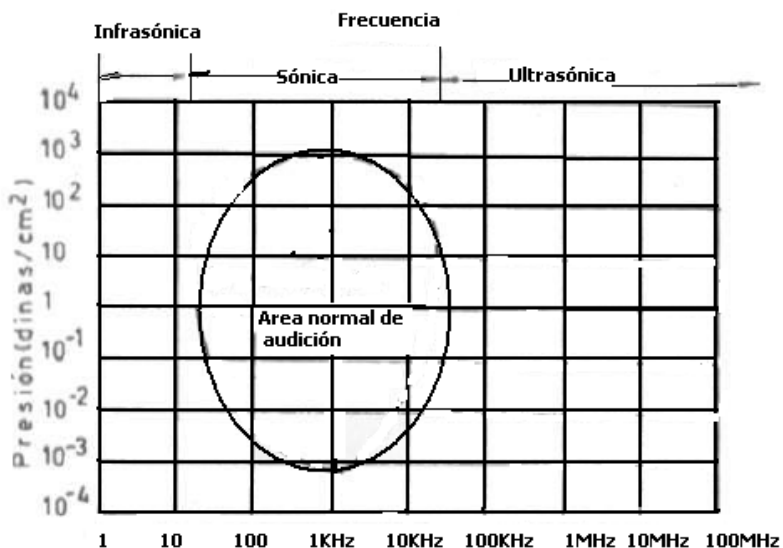


Fig. 2-10: Espectro acústico.

Se puede hacer una subdivisión de acuerdo a la duración del sonido en:

**Sonido continuo:** la duración del sonido es mucho mas larga que el tiempo de oscilación,

**Sonido pulsado:** aquí la duración del sonido es solamente unas pocas veces el tiempo de oscilación. El intervalo entre dos pulsos es mucho mas largo que la duración del pulso, ver Fig. 2-11.

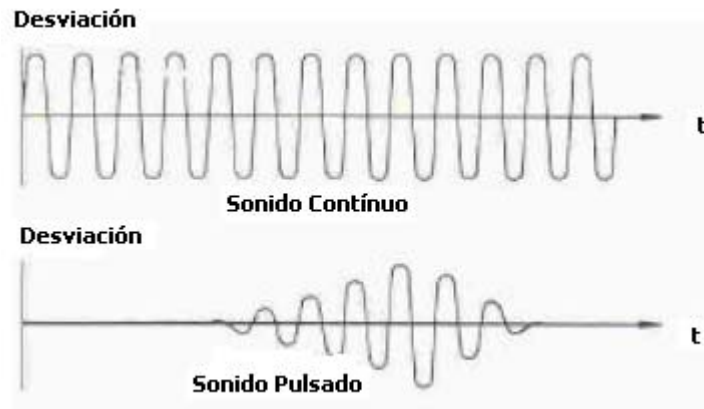


Fig. 2-11: Sonido continuo y por pulsos graficado vs. Tiempos

#### **2.2.4.1 Propagación del sonido:**

Como ya se mencionó, la propagación de las ondas sonoras está vinculada a la materia. Por ejemplo si una onda sonora se está propagando, debe existir un material sólido, líquido o gaseoso, por lo que se deduce que la onda sonora no es más que la propagación de las vibraciones de las partículas del material elástico. Ya que líquidos y gases no ofrecen ninguna resistencia a los esfuerzos cortantes, las ondas transversales (ondas de corte) no pueden ser propagadas en estos medios:

*En líquidos y gases solamente pueden ser propagadas ondas longitudinales.*

*En materiales sólidos, se pueden propagar las ondas longitudinales y transversales como así también todas sus combinaciones.*

Las ondas longitudinales o transversales puras, sólo se formarán si el espesor del material con respecto a la dirección de propagación de la onda, es considerablemente mayor que la longitud de onda.

De otro modo, se formarán en las chapas o láminas, un tipo de ondas combinadas de los dos anteriores, que son llamadas ondas de chapa o Lamb. Estas ondas se pueden subdividir en ondas de dilatación y flexión adicionales, ver Fig. 2-12.

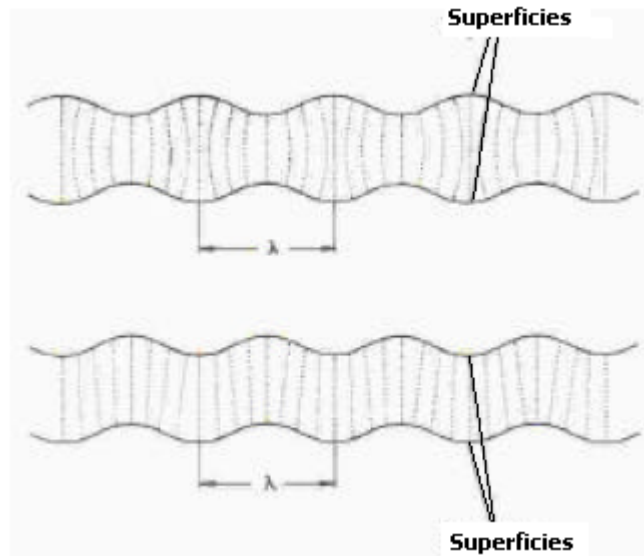


Fig. 2-12: Tipos de ondas de Lamb. Arriba: ondas de dilatación. Abajo: onda de deflexión.

Una nueva combinación de ondas longitudinales y transversales son las ondas superficiales, ver Fig.2-13, las cuales pueden existir solamente a lo largo de la superficie, siendo capaces de seguir una superficie curvada. Como se puede ver en la Fig 2-13, la profundidad de penetración de una onda superficial es aproximadamente igual a la mitad de la longitud de onda.

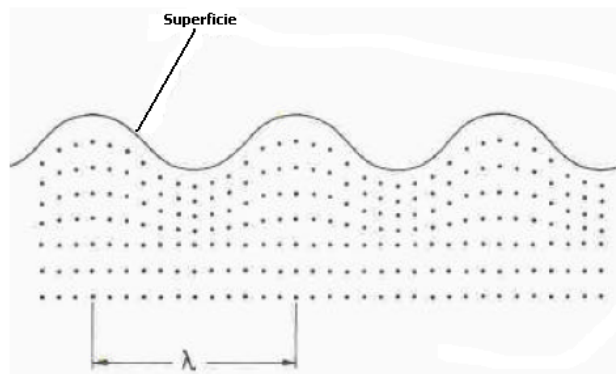


Fig.: 2-13: Onda Superficial.

Para completar, también serán mencionadas las ondas de torsión, las cuales se pueden dar en cuerpos con forma de barras. Estas, son oscilaciones rotacionales alrededor del eje



longitudinal de la barra, la dirección de propagación se sitúa en la dirección del eje longitudinal.

***La velocidad de propagación (velocidad de sonido) de ondas longitudinales, transversales o de superficie, son constantes del material (Ver Tabla 2-1), independientes de la frecuencia y dimensiones del material (ver apéndice 2-A1).***

<b>Material</b>	<b>V (pulg/s)</b>	<b>V (m/s)</b>
Aluminio (laminado)	0.2530	6.420
Berilio	0.5073	12.89
Latón (70 Cu, 30 Zn)	0.1850	4.700
Cobre (laminado)	0.1972	5.010
Duraluminio	0.2487	6.320
Hierro	0.2345	5.960
Plomo (laminado)	0.0771	1.960
Magnesio (calibrado)	0.2270	5.770
Molibdeno	0.2470	6.250
Monel	0.2105	5.350
Níquel	0.2377	6.040
Acero (normal)	0.2410	6.100
Acero (aleación ligera)	0.2259	5.730
Acero Inoxidable	0.2278	5.790
Titanio	0.2370	5.990
Wolfram, calibrado	0.2129	5.410
Uranio	0.1330	3.370
Cinc (laminado)	0.1657	4.210
Cinc (inyectado)	0.1756	4.460
Aluminio	0.4013	10.19
Cristal de Cuarzo	0.2349	5.968
Vidrio Pirex	0.2220	5.640
Plexiglás	0.1077	2.735
Nylon	0.1031	2.620
Polietileno	0.0705	1.950
Poliestireno	0.0925	2.350
Goma Silicona	0.0373	0.948
Agua	0.0590	1.490

**Tabla 2-1: Velocidades de sonido de Materiales más comunes.**

### 2.2.4.2 El comportamiento de ondas sónicas en superficies limites

#### a) Dirección del sonido en superficies limites perpendiculares.

Si una onda sónica incide normalmente en la interfase de dos materiales, una parte de la energía sónica es transmitida al otro material, mientras que otra parte será reflejada, como se muestra en la Fig. 2-14.

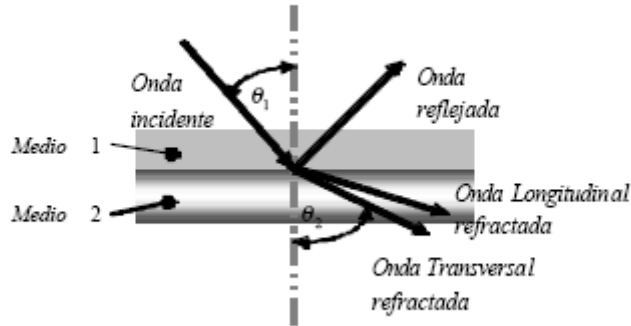


Fig. 2-14: Transmisión de onda en dos medios diferentes.

Las proporciones de energía transmitida y reflejada dependen de la impedancia de los dos materiales.

La impedancia acústica se puede calcular como:

$$Z = \rho \times c$$

Donde  $Z$  = impedancia acústica.

$\rho$  = densidad del material del medio considerado

$c$  = velocidad del sonido del medio considerado

Si una onda sónica viaja a través de un material con impedancia acústica  $Z_1$ , e incide perpendicularmente en una interfase correspondiente a otro material con impedancia acústica  $Z_2$ , se pueden definir las siguientes magnitudes:

$$\text{Índice de reflexión: } I_R = \frac{(Z_1 - Z_2)^2}{(Z_1 + Z_2)^2}$$

$$\text{Índice de transmisión: } I_T = \frac{4Z_1Z_2}{(Z_1 + Z_2)^2}$$

El factor de reflexión da la proporción (%) de presión acústica reflejada y el factor de transmisión da la proporción de presión acústica transmitida en el segundo material.

“ $I_R$ ” puede ser positivo o negativo, “ $I_T$ ” puede ser mayor o menor que 1, dependiendo cuál de los dos,  $Z_1$  ó  $Z_2$  es mayor. Esto no está en contraposición con el principio de energía, sino que aquí se considera la presión acústica y no la energía (o intensidad) acústica. Un material con alta impedancia acústica es llamado “acústicamente duro” y uno de baja impedancia, “acústicamente blando”.

***Si la impedancia acústica de los dos medios son iguales ( $Z_1=Z_2$ ), no hay reflexión ( $I_R=0$ ), el sonido pasa a través de la interfase sin alterarse ( $I_T=1$ ).***

Será mencionado nuevamente que los valores de  $I_R$  y  $I_T$  están relacionados con la presión y no con la intensidad acústica. Esta forma de representación ha sido elegida deliberadamente, puesto que la amplitud del eco que aparece indicado en un equipo de ultrasonido es proporcional al valor de la presión acústica.

De las expresiones anteriores se deduce, en primer lugar, que la presión acústica reflejada será de la misma amplitud, cualquiera sea el lado de la superficie límite sobre el cual incide la onda, es decir, independiente de la secuencia de ambos materiales; si bien en el caso de ser  $Z_2 > Z_1$ ,  $I_R$  será positivo lo que indica que la onda incidente y la reflejada están en la misma fase y, en caso contrario, ( $Z_2 < Z_1$ ),  $I_R$  será negativo, lo que indica una inversión de fase de la onda reflejada con relación a la incidente.

En cambio, la presión acústica transmitida, si bien en fase con la onda incidente, no será independiente de la secuencia de los dos materiales, de manera que se  $Z_2 > Z_1$ ,  $I_T > 1$ , lo que indica que su amplitud será mayor que la de la onda incidente y en caso contrario ( $Z_2 < Z_1$ ,  $I_T < 1$ ) menor. Ver Fig. 2-15.

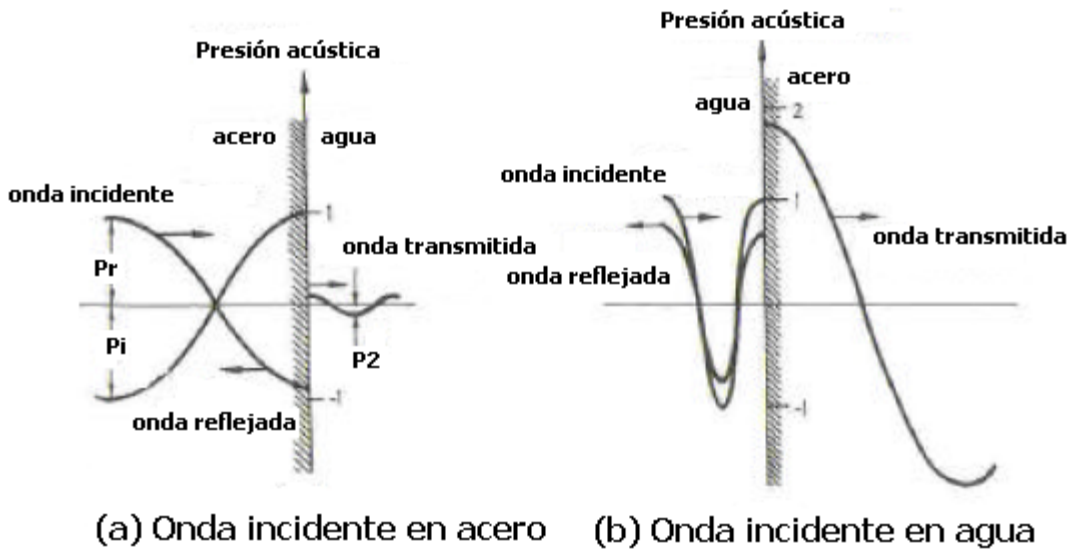


Fig. 2-15: Valores de la presión acústica en el caso de la reflexión en una superficie. Limite acero-agua.

**b) Incidencia oblicua en la interfase**

Si la onda sónica incide sobre la interfase con un ángulo oblicuo, los fenómenos que ocurren son considerablemente más complicados que con una incidencia normal. Nuevamente hay una componente reflejada y otra transmitida, pero el hecho además origina que parte de la energía acústica sea convertida en otro tipo de onda, por lo que habrá dos ondas reflejadas y dos transmitidas, ver Fig. 2-16.

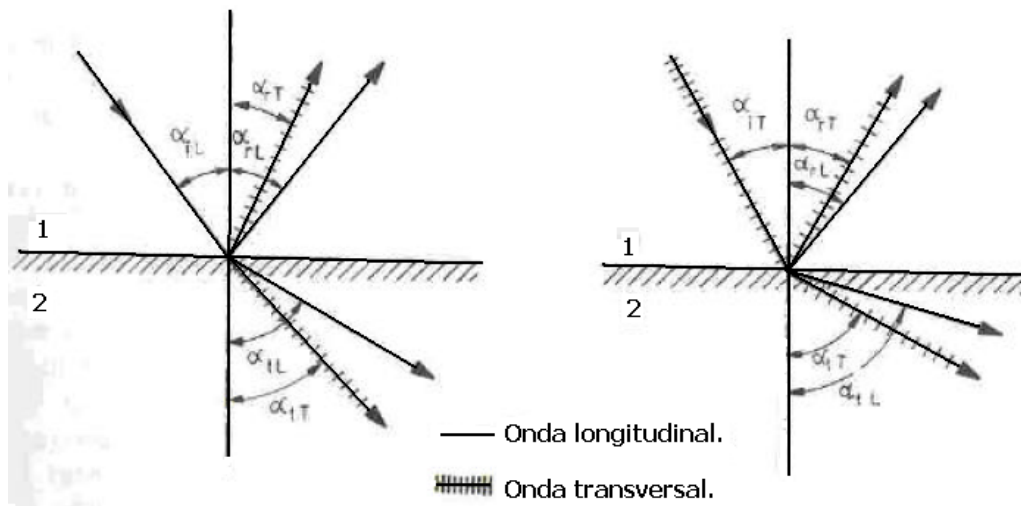


Fig. 2-16: Incidencia oblicua de una onda sónica.

A partir de la incidencia de una onda longitudinal con un ángulo oblicuo se crearán:

- ☞ Una onda longitudinal reflejada.
- ☞ Una onda transversal reflejada.
- ☞ Una onda longitudinal refractada.
- ☞ Una onda transversal refractada.

En medios líquidos y gaseosos, por supuesto, la componente transversal asociada desaparece.

Las diferentes direcciones están definidas por el ángulo formado entre la onda y la normal en el punto de incidencia sobre la interfase.

Con una incidencia oblicua del sonido sobre la interfase entre dos medios, se aplican leyes físicas similares a las utilizadas en óptica.

Con una proporción de sonido pasando a través de la interfase, uno hablará, por analogía con la óptica, de “refracción” u “onda refractada”, mientras la expresión “reflexión” se conservará.

**La ley de Snell** de refracción, bien conocida en óptica, es también válida aquí y es:

$$\frac{\text{sen}\alpha_1}{\text{sen}\alpha_2} = \frac{C_1}{C_2} \quad ; \quad \frac{\text{sen}\alpha_1}{C_1} = \frac{\text{sen}\alpha_2}{C_2}$$

La relación es aplicable para todo tipo de ondas, independientemente si uno esta trabajando con la componente reflejada o refractada. Solo los ángulos correspondientes y las velocidades de propagación deben ser introducidos en la fórmula.

## **2.3 Principios básicos de los instrumentos**

Los modelos del instrumental para ensayos ultrasónicos están constantemente cambiando debido al progreso técnico; sus principios básicos tienen, sin embargo, una vigencia inalterable.

Estos conocimientos deberían ser familiares al operador, para que le permitan la selección del método óptimo para resolver su problema de ensayo entre varias posibilidades.

En esta sección de este trabajo se describe los tipos de palpadores usados comúnmente tanto como la construcción de los instrumentos y sus accesorios más simples.

El ultrasonido comprende la región que comienza más allá de la frecuencia de 20 KHz.

### **2.3.1. Generación de ultrasonido**

#### **2.3.1.1. Procedimientos mecánicos**

Existe un gran número de métodos para generar ultrasonidos; en principio sirven ya los mismos procedimientos que se emplean para generar sonidos audibles. Si los dispositivos capaces de oscilar se construyen con una frecuencia propia correspondientemente alta. Pero, estos procedimientos mecánicos, y algunos otros principios, no se utilizan en el ensayo no destructivo de materiales, recurriéndose por el contrario a otros efectos físicos, a saber: el efecto magnetoestrictivo, y sobre todo el efecto piezoeléctrico.

#### **2.3.1.2. Efecto magnetoestrictivo**

Los materiales ferromagnéticos (muy especialmente el níquel, además del acero), tienen la propiedad de contraerse o expandirse por efecto de un campo magnético.

Inversamente, en una barra de acero ferromagnético se produce un campo magnético si es expuesta a un esfuerzo de tracción o compresión.

Este efecto se aprovecha para lograr altas potencias sonoras a relativamente bajas frecuencias.

#### **2.3.1.3. Efecto piezoeléctrico**

El efecto piezoeléctrico reviste una importancia mucho mayor, siendo aprovechado casi universalmente para el ensayo no destructivo de materiales. Ciertos cristales naturales o sinterizados tienen la propiedad de que en presencia de un esfuerzo de tracción o compresión se originan cargas eléctricas en su superficie. La carga cambia de signo si se invierte la dirección del esfuerzo. Así es que en las superficies de un cristal expuesto

alternativamente a un esfuerzo de tracción y un esfuerzo de compresión existe un potencial alternativamente positivo y negativo (tensión alterna).

El efecto piezoeléctrico es reversible, es decir, cuando se aplica una carga eléctrica a la superficie del cristal, esta se contrae o se expande según el signo de la carga eléctrica. Una tensión eléctrica alterna, aplicada a las superficies del cristal, da origen a oscilaciones mecánicas de presión (expansión y contracción); Ver apéndice 2-A2.

**Características de algunos materiales piezoeléctricos.**

**Cuarzo:** fue el primer material usado. Tiene características muy estables en frecuencia, sin embargo es muy pobre como generador de energía acústica y es comúnmente reemplazado por materiales muy eficientes.

**Sulfato de Litio:** es muy eficiente como receptor de energía acústica, pero es muy frágil, soluble en agua y su uso está limitado a temperaturas por debajo de los 75° C.

**Cerámicas Sinterizadas:** producen los generadores más eficientes de energía acústica, pero tienen tendencia al desgaste.

Existe una gama de materiales piezoeléctricos que se utilizan cuyas ventajas y desventajas se describen a continuación en la siguiente tabla (tabla 2.2):

Material	Eficiencia como transmisor	Eficiencia como receptor	Sensibilidad	Poder de resolución	Características mecánicas
Cuarzo	Mala	Mediana	Escasa	Optima	Buena
Sulfato de litio	Mediana	Buena	Buena	Optima	Soluble en agua
Titanato de bario	Buena	Mediana	Optima	Mediana	Frágil
Metaniobato de bario	Buena	Mediana	Optima	Optima	Buena
Zirconato titanato de plomo	Buena	Mediana	Optima	Mediana	Buena

**Tabla 2-2: Materiales piezoeléctricos.**

### **2.3.2 Procedimiento de ensayo ultrasónico**

Una onda ultrasónica incidente (ver Fig. 2-14): en parte se refracta y en parte se refleja si existe una variación de la resistencia a la onda sonora, como en el caso en que exista un defecto dentro del material.

De ello se derivan dos procedimientos de ensayo, basados respectivamente, en la evolución de la parte transmitida de la onda o de la parte reflejada de la misma.

#### **2.3.2.1 Procedimiento de transmisión**

En este procedimiento se evalúa la parte del ultrasonido que ha sido transmitido a través de la pieza que se ensaya.

A un lado de la pieza se aplica un emisor de sonido y al otro lado, un receptor.

En presencia de un defecto, la intensidad sonora en el receptor disminuye a causa de la reflexión parcial o se hace nula en caso de reflexión total (Fig. 2-17). Lo mismo da que se emplee sonido continuo o impulsos de sonido para el ensayo, pues el emisor y el receptor eléctricamente están separados entre sí.

En este ensayo no se puede determinar la profundidad a la que está localizado el defecto de la pieza.

Existen dos zonas de transmisión en el recorrido del sonido:

Dado que se utilizan dos palpadores, existen dos zonas de transmisión en el recorrido del sonido (“acoplamiento”) que influyen sobre la intensidad de sonido en el receptor (la zona de transición del emisor a la pieza objeto y la de la pieza en el receptor).

Así mismo es necesaria una exacta alineación geométrica entre el emisor y el receptor.



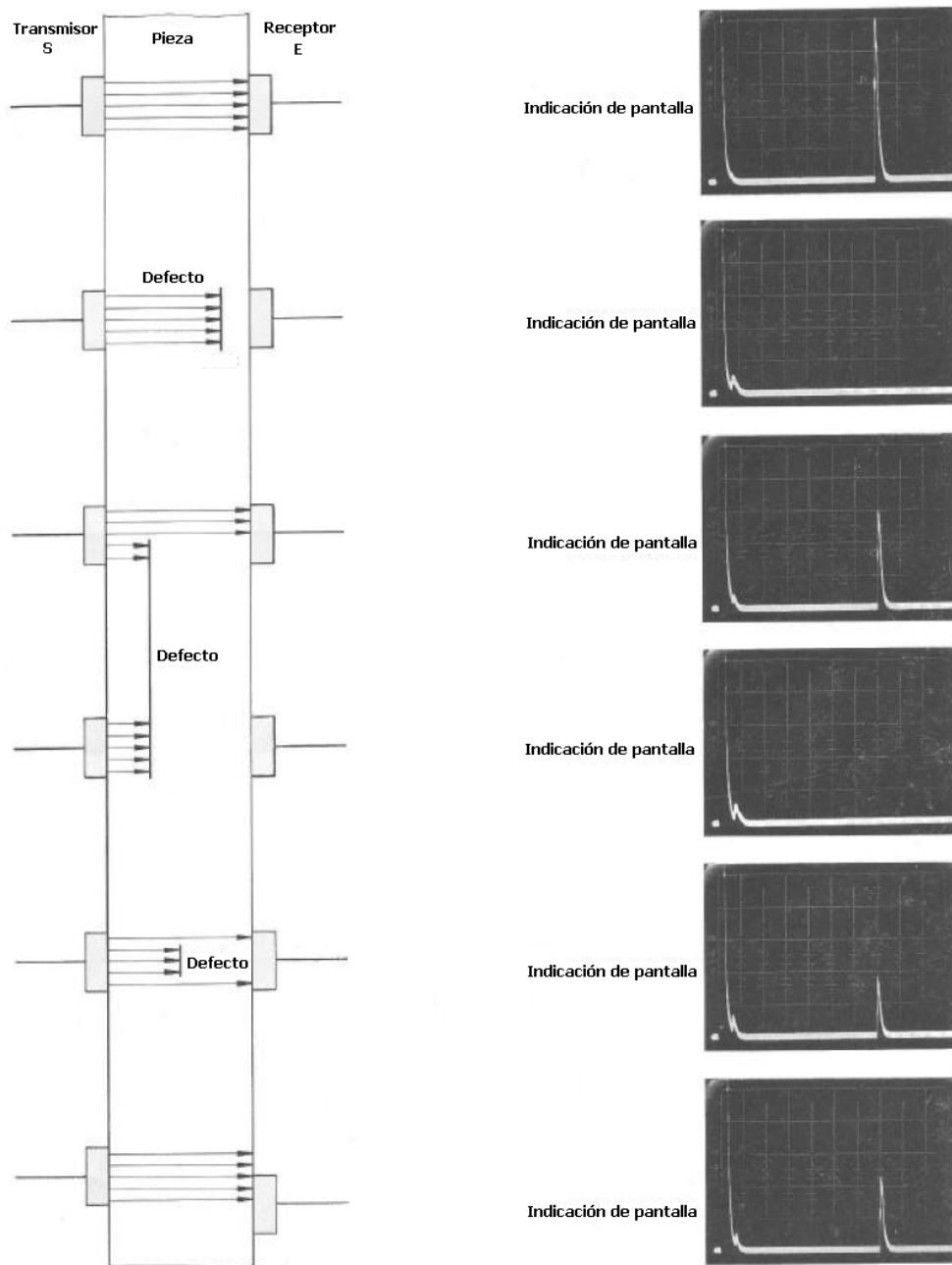


Fig. 2-17: Método por transmisión (esquema).

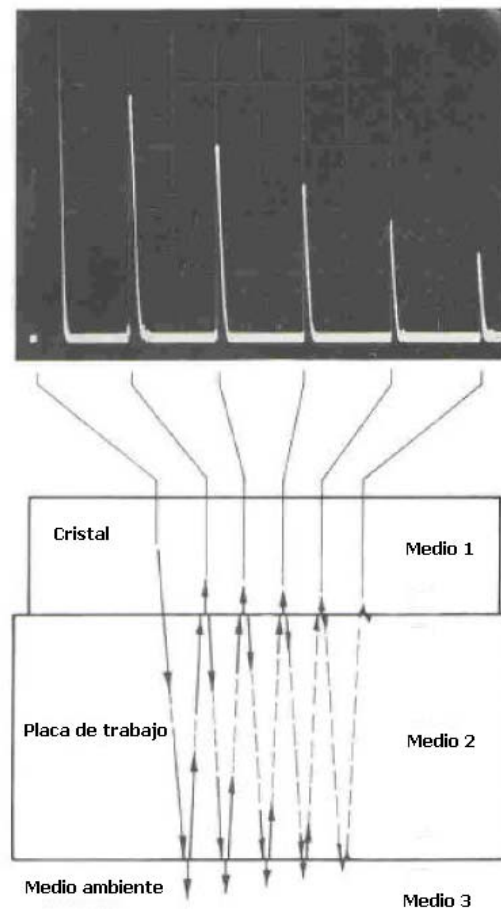
### 2.3.2.2 Procedimiento de pulso-eco

Este procedimiento que se designa también como procedimiento de pulsos o impulsos reflejados, utiliza la porción reflejada del sonido para la evaluación de defectos. El oscilador piezoeléctrico funciona a la vez como emisor y como receptor. Como la energía recibida es mucho más débil que la emitida, aquí no puede operarse sobre la base sonido

continuo, empleándose exclusivamente impulsos de sonido. Un impulso eléctrico de cortísima duración genera una análoga onda ultrasónica; inmediatamente después, mientras aún se está propagando la onda, el mismo oscilador esta listo para la recepción. La onda sonora penetra en el material, hasta que, como resultado de una superficie límite, tiene lugar una reflexión parcial o total.

Si la superficie reflectante se encuentra perpendicularmente a la dirección de propagación de la onda sonora, ésta es reflejada en su primitiva dirección y al cabo de un tiempo determinado, que depende de la velocidad del sonido en el material objeto de ensayo y de la distancia que existe entre el oscilador y la superficie reflectante, llega de vuelta al oscilador, siendo reconvertida en un impulso eléctrico.

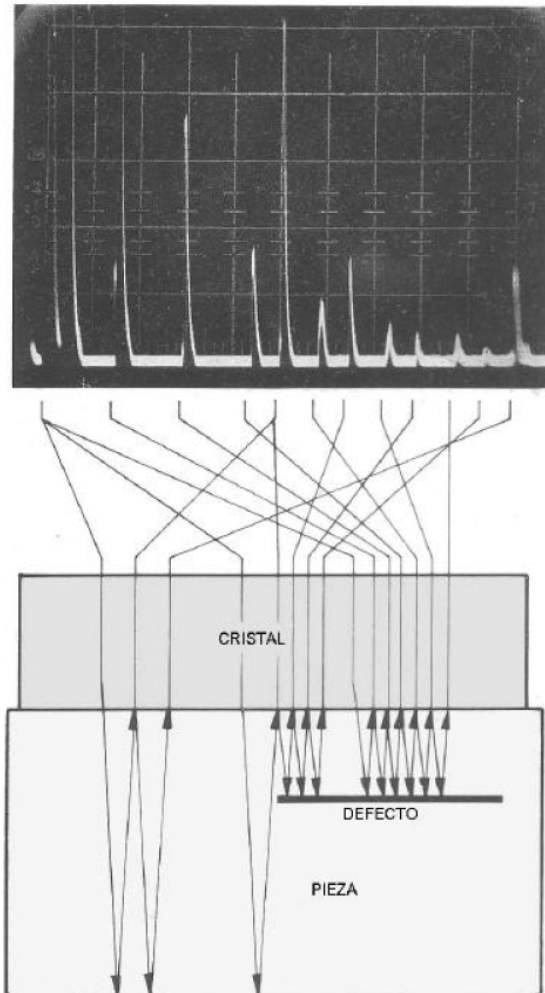
Ahora bien, no toda la energía que regresa es reconvertida en energía eléctrica, sino que en la interfaz entre el palpador y la superficie de la pieza tiene lugar de nuevo una reflexión parcial; una parte menor del sonido atraviesa por segunda vez a la pieza, y así sucesivamente. De este modo se origina una sucesión de ecos (Fig. 2-18).



**Fig. 2-18: Formación de ecos múltiples (esquema).**

Debe tenerse presente además que no solamente el lado posterior, sino cualquier otro reflector (defecto) determina ecos múltiples (Fig. 2-19).

Puesto que se puede medir el tiempo de recorrido y se conoce la velocidad del sonido de la mayor parte de los materiales, este método permite establecer la distancia existente entre el oscilador y la superficie refractante, o dicho de otro modo, determinar la posición del reflector. Por esto es que se emplea este procedimiento en la mayoría de los casos. Agregase a ello que no hay más que una sola superficie de acoplamiento (que es atravesada en el viaje de ida y de vuelta) entre el oscilador y la pieza, por lo que resulta mucho más sencillo mantener constante el acoplamiento.



**Fig. 2-19: Ecos múltiples causados por el eco de fondo y un defecto (esquema).**

### 2.3.3 Palpadores

#### 2.3.3.1 Propiedades

Todos los palpadores utilizados en el ensayo de ultrasonido, no destructivo de materiales, operan sobre la base del efecto piezoeléctrico.

El transductor, muchas veces designado genéricamente pero equivocadamente como cuarzo recibe un corto impulso eléctrico.

La oscilación del cristal decae lentamente en su propia frecuencia de resonancia como ocurre en el caso de una campana tañida brevemente (Fig.2-20). Esta frecuencia propia surge para la oscilación fundamental, de la ecuación:

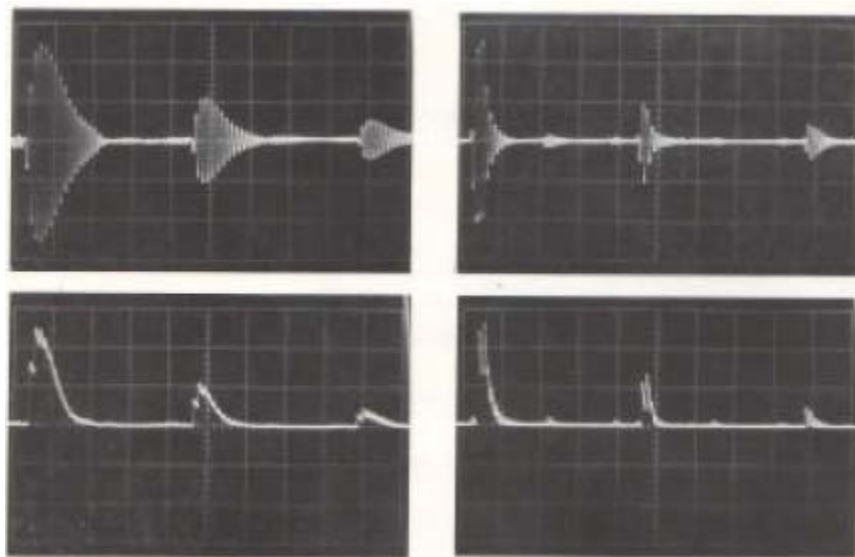
$$f_0 = \frac{C}{2d}$$

Donde

C: Frecuencia natural

$f_0$ : Velocidad del sonido en el material del transductor

d: Espesor del cristal.



**Fig. 2-20:** Arriba: vibración de un cristal débilmente atenuado y de otro fuertemente atenuado; Abajo: La misma señal sobre la pantalla del TRC después de rectificadas y filtradas.

Ahora bien, como en el procedimiento de impulso-eco, el cristal, eventualmente debe, tras un intervalo extremadamente corto, funcionar otra vez como receptor, es preciso obtener en el menor tiempo posible la atenuación de las oscilaciones inductivas. Pero esta atenuación no deberá ser demasiado fuerte tal que reduzca pronunciadamente la sensibilidad del palpado.

Desafortunadamente el requisito de alta sensibilidad de respuesta y, al mismo tiempo, pulsos estrechos dando alta resolución se oponen mutuamente.

El término resolución designa la capacidad de respuesta del palpador, para dar indicaciones separadas de dos discontinuidades muy próximas entre sí, en forma claramente separados en la pantalla del osciloscopio. Además esto se distingue entre resolución próxima y resolución lejana.

Estas expresiones se refieren a la distancia desde el transmisor de pulsos (oscilador) y pueden ser diferentes.

***Con un oscilador débilmente atenuado se obtiene una alta potencia y sensibilidad pero, a causa de lo ancho de los impulsos un menor grado de resolución.***

***Con un oscilador fuertemente atenuándose obtiene una alta resolución (pulsos angostos) y potencia y sensibilidad decreciente.***

El poder de resolución también depende del material del transductor. Los esfuerzos de los constructores de los palpadores tienden hacia un compromiso lo más ventajoso entre otros factores condicionantes. En parte hay palpadores construidos especialmente o para alta potencia o para alta resolución.

Para transmitir una cantidad suficiente de energía sonora a la pieza que se ensaya, es necesario que el transductor genere unas pocas vibraciones de alta frecuencia. Sin embargo, oscilaciones de bajas frecuencias insumen más tiempo que aquellos palpadores de alta frecuencia (por Ej. a 1 MHz, un micro-segundo; a 10 MHz, 0.1 micro-segundo).

### **2.3.3.2 Campo sónico**

El área influenciada por las vibraciones transmitidas por el palpador se conoce como campo sónico. Este es muy importante para la evaluación del tamaño de defectos; por ello, es

necesario explicar brevemente algunos términos especiales que conciernen al campo sónico y comportamiento de la presión acústica en él. Cumpliendo con los principios físicos, el cristal transmite las ondas ultrasónicas únicamente en sentido perpendicular a las superficies a las que se aplican cargas eléctricas; esto ocurre, aproximadamente, en forma de un haz de rayos paralelos, con una sección transversal correspondiente al diámetro del transductor para la primera parte de la propagación.

A una cierta distancia del oscilador, el haz se abre en forma de cono. Esta característica se muestra en la figura 2-21.

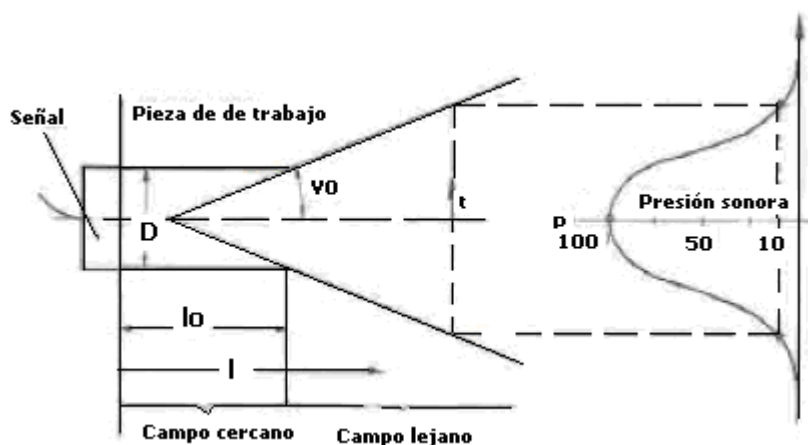


Fig. 2-21: Campo ultrasónico de un transductor.

***El área de rayos ultrasónicos paralelos se llama campo cercano.***

***El área de rayos que se abren cónicamente se llama campo lejano.***

La distancia a la cual el campo cercano pasa sobre el campo lejano es llamada “rango del campo cercano” o “longitud del campo cercano”, para el cálculo de esta distancia ver Apéndice 2-A3.

### **2.3.3.3. Descripción de palpadores ultrasónicos**

#### **a) De incidencia normal**

Para un haz de incidencia normal, (la transmisión del sonido es perpendicular a la superficie de la pieza) son válidas las leyes de la sección 2.2.4.2 (a).

### **b) El palpador normal**

El nombre de “Palpador normal”, deriva de la dirección en que las ondas ultrasónicas viajan en la pieza (la dirección perpendicular a la superficie de un objeto se conoce como la dirección “normal”).

El cristal del transductor tiene metalizadas las caras para poder aplicarle pulsos eléctricos. Una de esas caras se pega al cuerpo amortiguador, la otra puede bien ser acoplada directamente a la pieza a ensayar (cristal sin protección), o estar cubierta con una capa de material plástico o cerámico.

Las características del tamaño del palpador dependen de las propiedades de amortiguamiento o cuerpo de atenuación. Los alambres de conexión, soldados a las caras plateadas del cristal, suben pasando junto al cuerpo amortiguador hacia una pequeña bobina que realiza la adaptación eléctrica entre el oscilador y el emisor de impulsos. Dos alambres adicionales van a la ficha en que se inserta el cable.

Los palpadores para la técnica por inmersión tienen en lugar de ficha, un enchufe directo, fijamente fundido, para el cable.

La unidad compuesta por el oscilador, el cuerpo amortiguador y la bobina es también llamada “Inserto” o “Nob”, y va alojada en una carcasa metálica puesta a tierra (Fig.2-22).

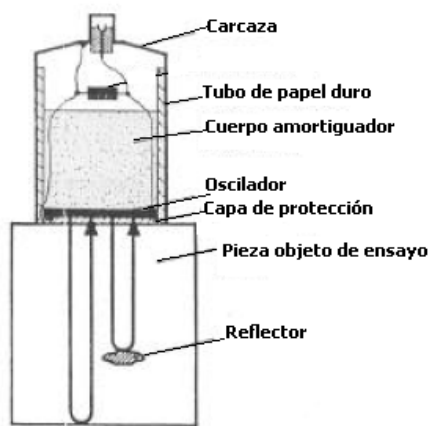


Fig. 2-22: Palpador normal con suela protectora (esquema).

### **c) Palpadores de doble cristal**

Los palpadores de doble cristal combinan dos sistemas de palpadores completos, en una sola carcasa. Una barrera acústica entre los dos sistemas evita la transmisión de uno a otro dentro del palpador, mientras que uno actúa como emisor, y el otro como receptor.

Por esto, el sistema se puede asumir como una combinación del método de transmisión y reflexión. Entre los cristales y la superficie de la pieza que se ensaya hay lo que se llaman “líneas de retardo” contruidos de plástico (plexiglás) o, para superficies calientes, de material cerámico resistente al calor, lo que hace que el pulso transmisor no coincida con el punto cero de la pantalla, correspondiendo a la superficie de la pieza como se conoce con el uso de palpador normal.

El pulso transmisor aparece a la izquierda del punto cero y, cuando se lleva a cabo la calibración, esta señal queda afuera del campo de observación. La propagación ultrasónica como muestra la figura 2.23 explica el principio:

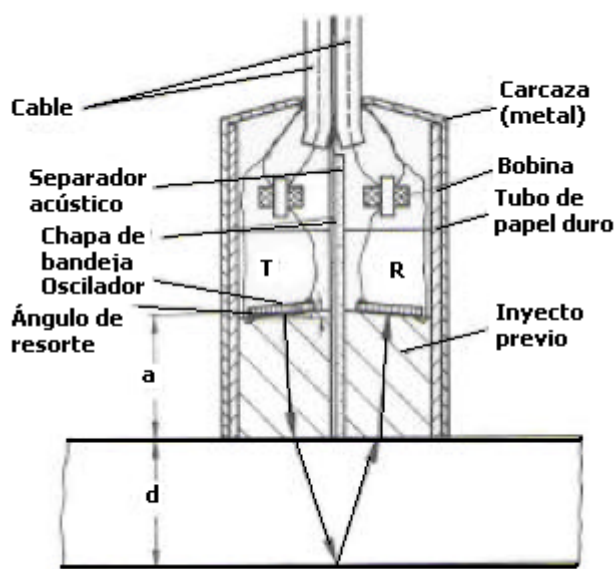


Fig. 2-23: Palpador con doble cristal (esquema).

La onda ultrasónica generada por el transmisor T primero atraviesa el bloque plástico y llega a la superficie límite entre éste y la pieza, donde una parte del haz es reflejado hacia el cristal transmisor. Como éste no esta conectado con la sección receptora del equipo, la onda sonora reflejada no es indicada (esto sucedería si el palpador fuera normal). La otra parte de la onda que fue transmitida dentro de la pieza que se ensaya, viaja hasta la superficie trasera donde se refleja y vuelve a la superficie donde, nuevamente una parte es transmitida hacia el bloque plástico del receptor y llegando al transductor R, causa en él el primer eco de fondo. Una parte de la onda ha sido reflejada en la superficie forzándola a recorrer la pieza



por segunda vez antes de entrar en el bloque plástico y generar así el segundo eco de fondo. El mismo fenómeno sucede varias veces, lo que causa un tercer, cuarto, etc. ecos de fondo. Calculando desde el comienzo del pulso de emisión, los ecos recibidos aparecerán después de haber recorrido las siguientes distancias:  $2s + 2d$ ;  $2s + 4d$ ;  $2s + 6d$ ;  $2s + 8d$ ; etc. Los intervalos de los ecos múltiples sucesivos corresponden al espesor de la pieza, mientras que la distancia entre el pulso emitido y el primer eco de fondo es mayor en  $2s$  correspondiendo al espesor del recorrido de retardo (bloque plástico).

Como, sin embargo, la pantalla del TRC no indica la distancia real sino el tiempo de recorrido correspondiente, es necesario convertir la distancia en tiempo de acuerdo a la fórmula:

$$C = \frac{a}{t}; t = \frac{a}{C}$$

Donde:

C: velocidad del sonido.

a: longitud de onda.

t: tiempo de recorrido.

Por esto, las verdaderas distancias sobre la pantalla son las siguientes:

$$\frac{2s}{cs} + \frac{2d}{cd}; \frac{2s}{cs} + \frac{4d}{cd}; \frac{2s}{cs} + \frac{6d}{cd}$$

Donde:

s: espesor de la línea de retardo.

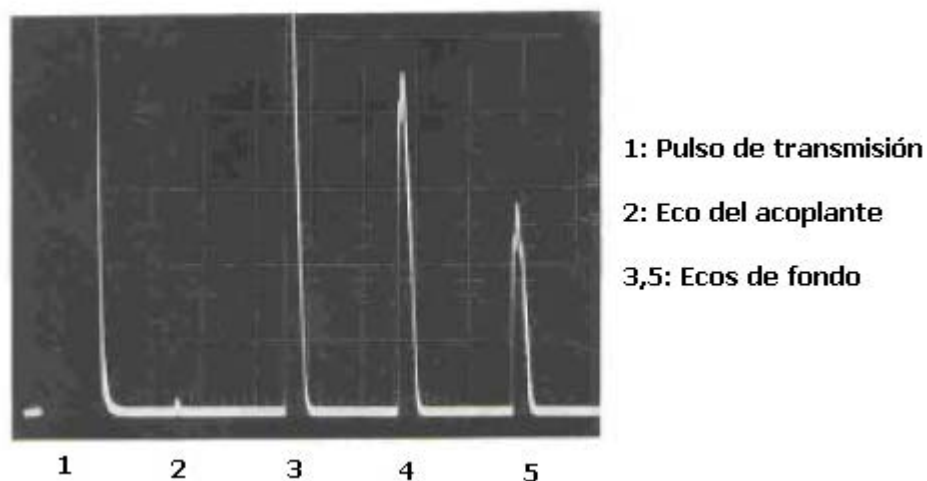
d: espesor de la pieza de ensayo.

cs: velocidad de retardo de la línea de retardo.

cd: velocidad del sonido en el material de la pieza.

De una consideración más detenida surge que debe, además, tenerse en cuenta que las partes de la onda sónica que llegan al oscilador emisor tanto como las que llegan al oscilador receptor, son reflejadas nuevamente, y, en el caso del cristal transmisor, penetran en la pieza con un retraso de tiempo de  $2s/cs$ , son también recibidas con ese retraso.

En el caso del receptor las ondas pueden ser reflejadas en la superficie límite entre el bloque de retardo y la superficie de la pieza, y también recibido nuevamente después del mismo retraso de tiempo. Principalmente lo mismo es válido para los correspondientes ecos múltiples. Además debería ser considerado que en realidad las distancias **s** y **d** no son las transversales del bloque de plástico y de la pieza, sino levemente mas largas que estas debido a los ángulos algo oblicuos del camino sónico. Estas diferencias deben ser consideradas para la medición exacta, por ejemplo la medición de espesores de pared.



**Fig. 2-24: Ecos múltiples de un palpador de doble cristal.**

La elección correcta del material del trayecto previo hace posible la atenuación de esas indicaciones de reflexiones de ecos no buscadas de tal forma que no interfieran sobre la pantalla; sin embargo, puede aparecer, cerca del punto cero (superficie de la pieza) y, a la distancia  $2s$  desde el eco de emisión (Fig. 2-24), un pequeño “eco de interferencia” causado por una deficiente barrera acústica entre el transmisor y el receptor, que se origina a través del acoplante. Este eco puede ser suprimido, en muchos casos, por un adecuado ajuste del equipo.

Los palpadores de doble cristal tienen, debido a su estructura general y a la presencia de los trayectos de retardo, teóricamente una más baja sensibilidad que los palpadores normales, pero una resolución a corta distancia incomparablemente mejor debido a que no aparece el eco de emisión sobre la pantalla, en un equipo ajustado correctamente.

De esta forma, es posible detectar posibles defectos a pocos milímetros por debajo de la superficie. Otro campo de aplicación de estos palpadores es la medición de espesores.

Se debe señalar que defectos con direccionalidad preferencial, por ejemplo finas líneas de inclusiones en productos laminados semi-terminados, mostrarán diferentes grados de reflexión dependiendo de la posición de la barrera acústica con respecto a la dirección del defecto.

Comúnmente, los mejores resultados se obtienen cuando ambas direcciones son paralelas.

#### **d) Palpadores normales de ondas transversales (corte - Y)**

La construcción de estos palpadores es igual a la de los palpadores normales de ondas longitudinales. Solamente, el transductor en sí mismo, tiene una orientación cristalográfica diferente y, por ello, genera vibraciones cortantes (ondas cortantes) (Fig. 2-3 del Apéndice 2-A2). El procedimiento de transmisión de ondas de corte desde el transductor al interior de la pieza es un problema difícil debido a que el líquido acoplante no se puede usar porque éstos son incapaces de transmitir ondas de corte (ver sección 2.2.4.1). El acople puede llevarse a cabo utilizando acoplantes rígidos (por ejemplo componentes de resinas epoxi), por presión firme del palpador sobre la superficie usando una goma protectora o lamina plástica debajo del cristal, o por acople del transductor sobre la pieza con el agregado de cera de abejas.

Por estas razones, los palpadores con cristales con corte Y son casi exclusivamente usados en laboratorios de ensayos, por ejemplo para la determinación de constantes elásticas de los materiales.

#### **2.3.3.4 Incidencia oblicua del ultrasonido.**

Ya se explicó en la sección 2.2.4.2. (b), que una onda que incide oblicuamente es capaz de generar cuatro nuevas ondas con diferentes direcciones y velocidades las cuales pueden ser calculadas con la ley de refracción.

**a) Palpador angular**

El palpador angular consiste esencialmente de un cristal cementado a una cuña de plexiglás. De esta forma se consigue una incidencia oblicua sobre la superficie de la pieza.

Los haces reflejados vuelven a la cuña plástica y, o son absorbidos por un atenuador convirtiéndose en calor, o se evita el retorno al transductor con una adecuada forma de la cuña para evitar causar indicaciones de ecos perturbadores. Dentro de la pieza se propagarán la onda longitudinal refractada y, adicionalmente, la nueva onda transversal generada. De acuerdo con la ley de refracción estos dos tipos de ondas tendrán también, debido a sus diferentes velocidades, diferentes direcciones.

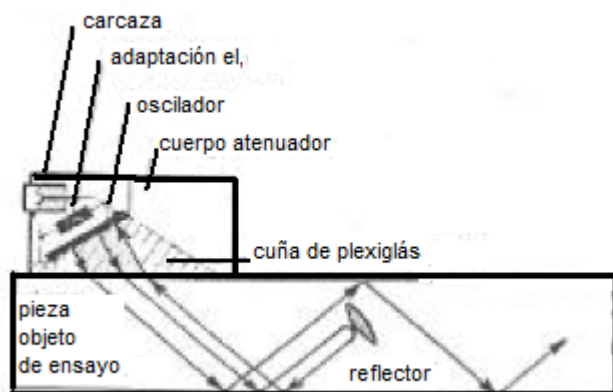


Fig. : 2-25 Palpador angular.

No puede determinarse en la pantalla del equipo si un eco tiene origen en una onda transversal o una longitudinal. Por ello una indicación sobre la pantalla puede tener distintos orígenes debido a los distintos ángulos y velocidades de los tipos de ondas, y, no sería posible la localización segura de un defecto detectado.

Una solución a este problema está dado por el hecho de que la onda longitudinal tiene, debido a su mayor velocidad, un ángulo de refracción mayor al de la onda transversal (Fig. 2-26a).

Incrementando gradualmente el ángulo de incidencia, se llegará a un punto en el cual la onda longitudinal no penetrará el medio sino que se propagará a lo largo de la superficie, mientras que la transversal permanecerá aún en la pieza de ensayo (Fig. 2-26b).

En este punto, el ángulo entre la dirección de la onda transversal y la perpendicular a la superficie será de  $33.2^\circ$  en el acero. Un incremento adicional del ángulo de incidencia

eliminará la onda longitudinal (no existe señal  $> 1$ ), por lo que puede ser calculado. Ahora la única onda que existe en el medio es la transversal (Fig. 2-26c). Si se continúa incrementando el ángulo de incidencia, también la onda transversal se propagará a través de la superficie del medio (onda superficial, Fig., 2-26d).

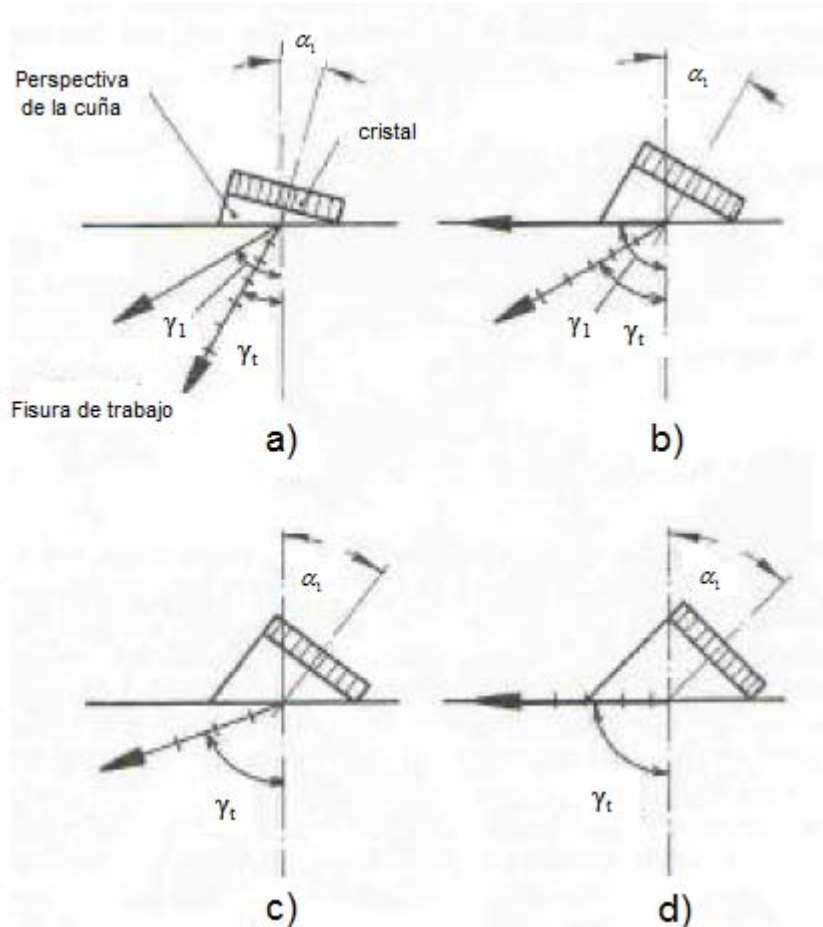


Fig. 2-26: dirección de propagación de onda como función del ángulo de incidencia.

Los palpadores angulares comerciales utilizan sólo el rango donde existe onda transversal, exclusivamente, en el medio de ensayo, el cual es normalmente acero. La onda ultrasónica real es emitida hacia el medio en la forma de un haz de rayos donde, la línea geométrica que se ha considerado hasta ahora, corresponde al eje de este haz. Las mismas relaciones que fueron consideradas con palpadores normales como campo cercano, campo lejano y ángulo de divergencia, son válidas para los palpadores angulares. El eje del haz donde existe la máxima presión sónica se marca en el lateral de los palpadores angulares como “punto de emisión” y sirve como punto de referencia para cálculos y medidas.

Además de los datos relativos a ángulo y punto de emisión y su línea de unión, respectivamente, la llamada “línea de emisión”, los palpadores angulares se indican adicionalmente por 2 veces la  $\text{tg } \alpha_1$ , que siempre es la misma para un ángulo particular. Esto se amplía en cálculos que son descritos en el apéndice 2-A4.

Cuando se usen palpadores angulares, deberán tenerse en cuenta los siguientes hechos fundamentales:

El ángulo marcado y el factor 2 veces la  $\text{tg } \alpha_1$  son sólo válidos para materiales con una velocidad sónica de las ondas transversales de 3,230 m/s. Estos valores no pueden ser usados para materiales con velocidades de ondas de corte diferentes pero pueden ser calculadas por medio de la ley de refracción ver apéndice 2-A5.

La indicación en la pantalla del TRC es segura sólo cuando el ángulo  $\alpha_t$  es mayor que  $33.2^\circ$ , debido a que la onda longitudinal será eliminada solamente con ángulos mayores que este. También esto es sólo válido para acero, por lo que para otros materiales con diferentes relaciones entre las velocidades de la onda longitudinal y la transversal se deberán chequear por medio de la ley de refracción. En la práctica son comúnmente usados los ángulos de  $35^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $60^\circ$ ,  $70^\circ$ ,  $80^\circ$  y  $90^\circ$  (palpador de onda superficial). Ángulos menores a  $35^\circ$  son, debido a la ambigüedad de las indicaciones, sólo usados en la solución de problemas especiales.

La indicación en la pantalla del TRC será bien definida solamente en presencia de un solo tipo de onda la cual es siempre, de acuerdo con la ley de refracción, la más lenta (onda transversal). Es imposible el caso inverso (onda longitudinal más lenta que la transversal).

Los palpadores angulares emiten ondas longitudinales. Las ondas transversales, son consecuencia de la refracción que se produce en la superficie límite entre la cuña de plexiglás del palpador y la pieza de trabajo.

De la misma forma que los palpadores normales, los angulares tienen una carcasa puesta a tierra y una bobina de adaptación, en cambio, muchas veces, no poseen un cuerpo de amortiguación debido a que la cuña de plexiglás, cementada al cristal, tiene una atenuación suficientemente alta.

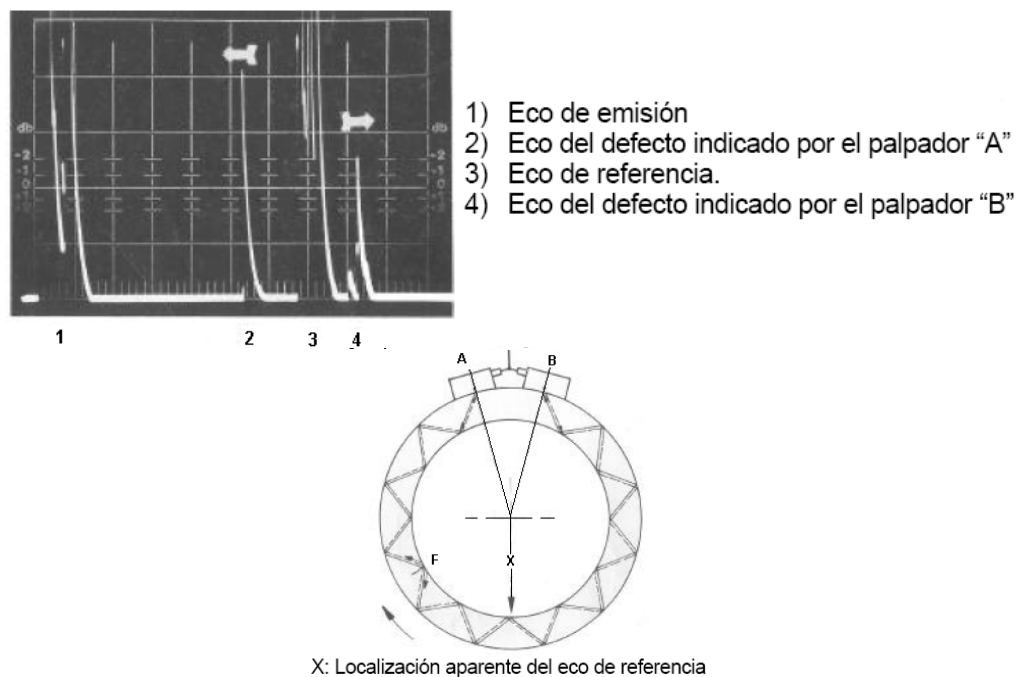
El cuerpo amortiguador ilustrado en la Fig. 2-25 sirve para atenuar las partes de ondas reflejadas en la superficie límite.

Un parámetro importante para la aplicación de palpadores angulares es el llamado “distancia de paso” o simplemente “paso1”.

Cuando un palpador angular se acopla a una chapa de espesor “d”, la onda ultrasónica será reflejada totalmente en la superficie inferior de la chapa y regresará a la superficie superior a una cierta distancia. A la distancia entre el punto de emisión de haz en el palpador y el punto recién descrito se le llama paso. Esto se muestra en el Apéndice 2-A4.

**b) Palpadores para ensayo de tubos**

El palpador para ensayo de tubos no es otra cosa que un arreglo de dos palpadores angulares, en paralelo, transmitiendo en direcciones opuestas (en dirección a las agujas del reloj y en dirección contraria a las agujas del reloj). Sirve para detectar fisuras internas y externas en tubos. Cada transductor en este par de palpadores angulares, recibe el pulso transmitido por el otro como un eco de referencia. Un defecto radial será indicado dos veces, como se puede ver en la figura 2-27. Esta indicación desaparecerá cuando se halle diametralmente opuesto al palpador. Un defecto aparecerá solamente una vez, ya sea a la derecha o a la izquierda del eco de referencia, según el palpador que lo indique. Hoy en día, este principio de transmisión de dos haces opuestos en una barra o tubo, es aplicado casi exclusivamente en plantas de ensayos automatizados.



**Fig. 2-27: Propagación ultrasónica y pantalla del TRC del ensayo de un tubo con dos palpadores.**

**c) Palpadores de ondas Lamb**

Cuando una onda ultrasónica incide oblicuamente en una chapa metálica, puede originar en ciertas condiciones (condiciones de excitación), ondas Lamb o también llamadas ondas de chapa. Esto significa que la chapa vibrará en forma similar a la resonancia. La onda Lamb se puede dar como una onda de dilatación o como una onda de flexión. La generación de estas ondas depende, entre otros factores, de la frecuencia, el ángulo de incidencia, de la velocidad del sonido, y del espesor del material. En la práctica, la generación se puede llevar a cabo variando continuamente el ángulo de incidencia hasta que, con ciertos ángulos, se producirán las ondas. De allí que, el espesor del material deberá ser del orden de la longitud de onda. En este principio se basan los palpadores de ondas de Lamb, los que por lo tanto no son otra cosa que palpadores angulares con ángulos con variación continúa. La capacidad de indicación de los palpadores de ondas de Lamb radica en que estas ondas son reflejadas sobre sí mismas cuando ya no son dadas las condiciones de excitación, por ejemplo, cuando el espesor de la chapa varía por defectos de laminación (exfoliaciones). Esto es también la razón para la alta sensibilidad de los ensayos con estas ondas.

De otra manera la sensibilidad de las indicaciones también dependen del tipo y orientación del defecto con respecto al tipo de onda Lamb; así, por ejemplo, las laminaciones son generalmente indicadas mucho mejor por una onda de flexión que por una de dilatación, cuando aquellas están situada en la fibra neutra de la pieza la que no está en movimiento en el caso de la onda de dilatación.

El principal rango de aplicación de los palpadores de ondas Lamb está en la detección de laminaciones e inhomogeneidades en hojas y placas metálicas que no permitan un ensayo con palpadores normales o de doble cristal debido a sus pequeños espesores, o cuando es necesaria una inspección completa en el total del volumen. Comúnmente se ensayan espesores de pared hasta 6 mm con estos tipos de ondas. El límite superior para el su uso esta entre 12 a 16 mm de espesores de pared y depende además de las propiedades del material y de la frecuencia usada.

Las ondas Lamb frecuentemente muestran una forma característica como la indicada en la Fig. 2-28, lo que facilita su reconocimiento.



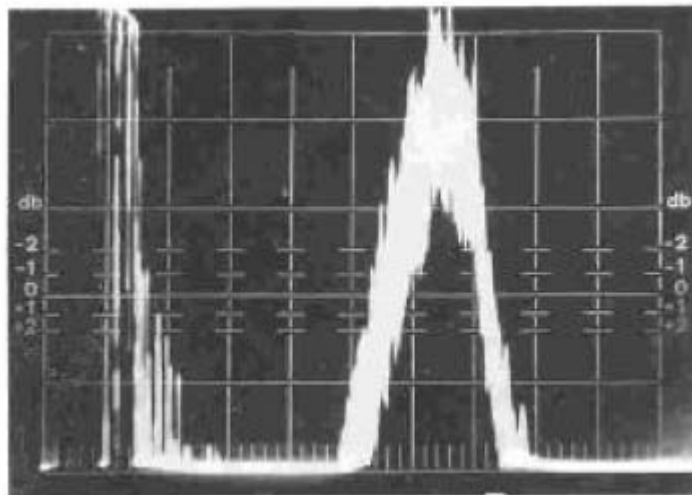


Fig. 2-28: Eco típico de una onda Lamb.

### **2.3.3.5 Palpador de ondas superficiales**

El palpador de ondas superficiales es un palpador con un ángulo de penetración de  $90^\circ$  entre el eje del haz y la dirección perpendicular (Fig. 2-26d). Aquí no se puede definir el punto de emisión del haz sobre el palpador.

Los ensayos ultrasónicos con ondas superficiales son poco frecuentes en comparación con otros tipos de ondas. El rango de aplicación es limitado, a pesar de la alta sensibilidad que muestran estas ondas en superficies laminadas, de algunas clases: la principal aplicación es la detección de finísimas fisuras e inhomogeneidades en superficies rectificadas o pulidas.

Como las ondas superficiales penetran solamente a una profundidad de la mitad de la longitud de onda (ver Fig. 2-13), fisuras a mayor profundidad no serán detectadas. De otra manera, las ondas superficiales son capaces de seguir superficies curvas si el radio de curvatura es suficientemente grande con respecto a la longitud de onda.

Se puede verificar muy fácilmente si una indicación ha sido causada por una onda superficial: tocando la superficie de la pieza con un dedo aceitado entre el palpador y la localización del defecto hará que la amplitud del eco disminuya (debido a la atenuación),

no así si la responsable de la indicación es otro tipo de onda (algunas ondas Lamb también pueden mostrar este comportamiento).

### 2.3.4 Equipos de ensayo ultrasónico

#### 2.3.4.1. Instrumental básico

El principio de operación de un equipo de ensayo ultrasónico se ilustra en la Fig. 2-29.

Un generador de pulsos induce al transmisor de pulsos el cual excita al cristal del transductor.

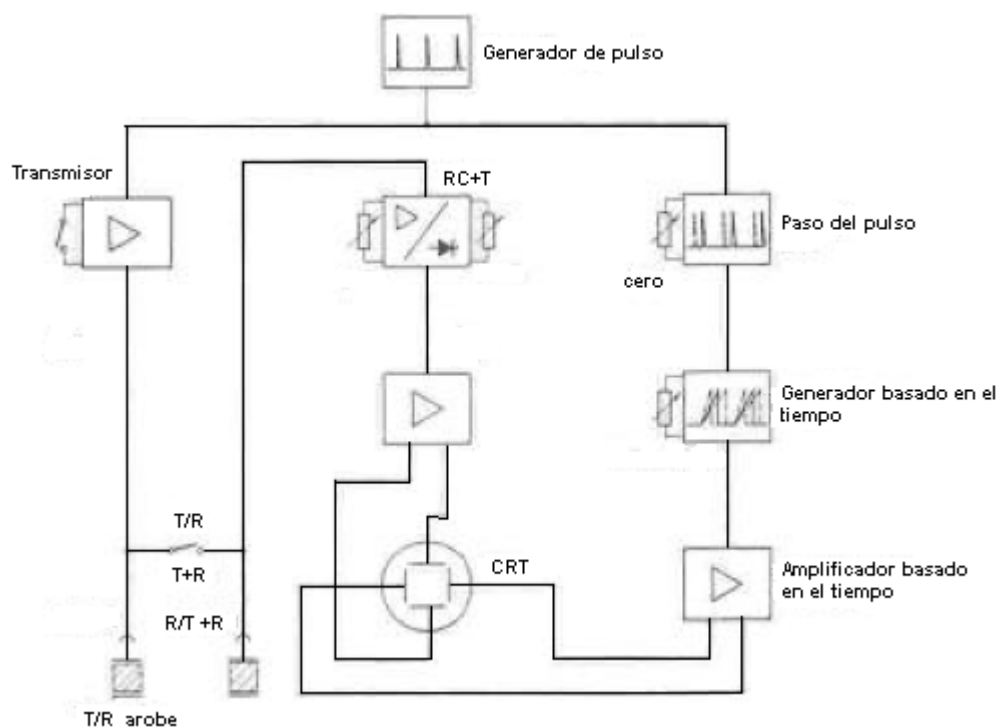


Fig. 2-29: Esquema de un equipo de U.S.

Este corto pulso eléctrico normalmente tiene un voltaje pico de algunos cientos de volts, en algunos viejos transmisores de tubos, por encima de los cinco kilovolt. Estos altos voltajes son, sin embargo, completamente inocuos debido a su extremadamente corta duración. El mismo generador de pulsos también activa (dispara) la base de tiempos (generador de barrido) horizontal en el osciloscopio de rayos catódicos (TRC) por medio de un circuito de tiempo de retardo.

La deflexión vertical en las placas del TRC se alimenta con un amplificador y un rectificador de pulsos (ecos) recibidos desde la pieza.

La longitud de medición (rango) que se observa en la pantalla se puede variar alterando la velocidad de la base de tiempo.

Se produce una deflexión vertical cada vez que el transductor está sujeto a una tensión eléctrica (pulso transmitido o recibido). Cuando se opera por el método de transmisión o con palpadores de doble cristal, el transmisor de salida está separado del receptor (entrada) por medio de un interruptor. En definitiva los transductores de transmisión y recepción están conectados separadamente por cables y enchufes. Un circuito de protección, en el caso del método de pulso-eco, asegura que los altos voltajes en el transmisor no dañen al receptor.

Hoy en día es habitual la construcción de modernos equipos ultrasónicos modulares; se construye instrumental para ensayo manual para ser usados con unidades cada vez más livianos, compactos y pequeños. Junto con los sistemas modulares hay muchas otras posibilidades para la combinación; de esta forma, por ejemplo, varios tamaños de pantallas pueden ser combinadas con distintos métodos de deflexión, supresión del llamado “césped”, etc. Módulos adicionales auxiliares, tales como diferentes tipos de monitores, circuitos especiales equivalentes para operar con múltiples palpadores, decodificadores, interruptores electrónicos, transmisores y receptores preamplificados se pueden integrar en este sistema.

De esta forma se puede elegir la más económica y efectiva combinación para solucionar el problema del cliente.

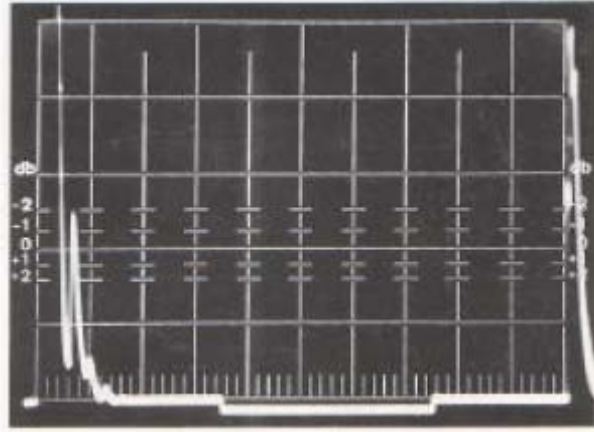
Seguidamente se describirán los controles más importantes de los equipos ultrasónicos para operar con el método de pulso-eco o transmisión.

#### **2.3.4.2 Monitores**

Un monitor es un aditamento auxiliar destinado a automatizar parcial o totalmente un ensayo.

Asimismo constituye un auxiliar valioso en los ensayos manuales en serie, eliminando la necesidad de que el operador observe constantemente la pantalla. Así el operador podrá atender al correcto posicionamiento y acople del palpador. El rango de operación del

monitor está ópticamente indicado en la pantalla por una pequeña deflexión hacia arriba o hacia abajo de la línea horizontal (Fig. 2-30). La posición y el ancho de este, también llamado “diafragma”, puede ser ajustado por medio del regulador correspondiente.



**Fig. 2-30: Diafragma del monitor.**

El monitor responderá en cuanto un impulso ocurra dentro de este diafragma. Se distinguen diferentes tipos de monitores según los distintos modos de respuesta y señales de salidas.

### **2.3.5 Sistemas de representación**

Hay tres tipos básicos de representación de pantallas de TRC para ensayos ultrasónicos:

#### **2.3.5.1 Representación “Tipo A” (o pantalla Tipo A)**

Es el más extendido y es el de representación en un tubo de rayos catódicos (TRC) en el que las indicaciones aparecen como deflexiones verticales de la base de tiempo, es decir, en la pantalla se representa el tiempo en la escala horizontal y la amplitud en la escala vertical. La representación tipo A (Fig. 2-31), se discrimina de izquierda a derecha.

La altura de los ecos pueden ser comparadas con la altura de un eco proveniente de un reflector de referencia conocido, a fin de tener una referencia del tamaño de la indicación.

El método de registro más sencillo para este tipo de pantalla es el de la fotografía directa del oscilograma. Sin embargo, este método es lento por lo que, en ocasiones, se acoplan al equipo sistemas de registro sobre papel que el propio operador puede manejar de manera simple, obteniendo la representación del oscilograma en tiempo real.

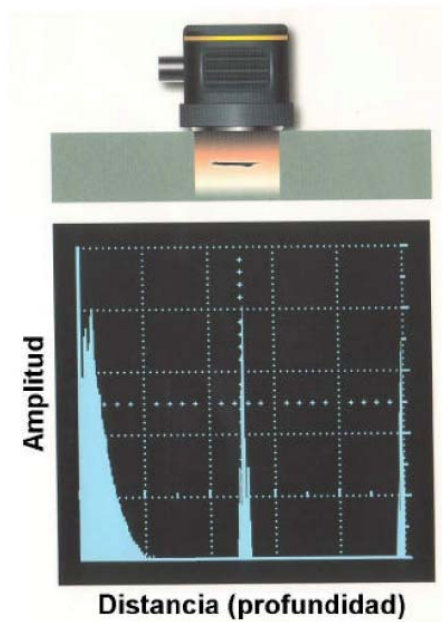


Fig. 2-31: Representación tipo A.

### 2.3.5.2 Representación "Tipo B"

La representación tipo B (Fig. 2-32), usa una pantalla de osciloscopio típico que muestra una vista de una sección transversal del material a ser ensayado. La imagen es retenida sobre el TRC el tiempo necesario para evaluar la pieza y para fotografiar la pantalla, con el objeto de obtener un registro permanente.



Fig. 2-32: Representación tipo B.

### 2.3.5.3 Representación “Tipo C”

La pantalla tipo C (fig. 2-33), representa una vista en planta, similar a una placa radiográfica. Además, muestra la forma y localización de la discontinuidad, pero no su profundidad.

Los sistemas de alta velocidad de barrido, generalmente utilizan pantallas tipo C, conjuntamente con graficadores, algunos de ellos con papel tratado químicamente.

El movimiento del papel está sincronizado con el movimiento del transductor a través de la superficie de ensayo.

La ventaja de la pantalla tipo C, es su velocidad y su capacidad de producir registros permanentes. Sin embargo, la pantalla solamente da longitud y ancho, pero no la profundidad de la falla.

Este tipo de representación, junto con el tipo B, prácticamente están reservados a los ensayos automáticos por inmersión.

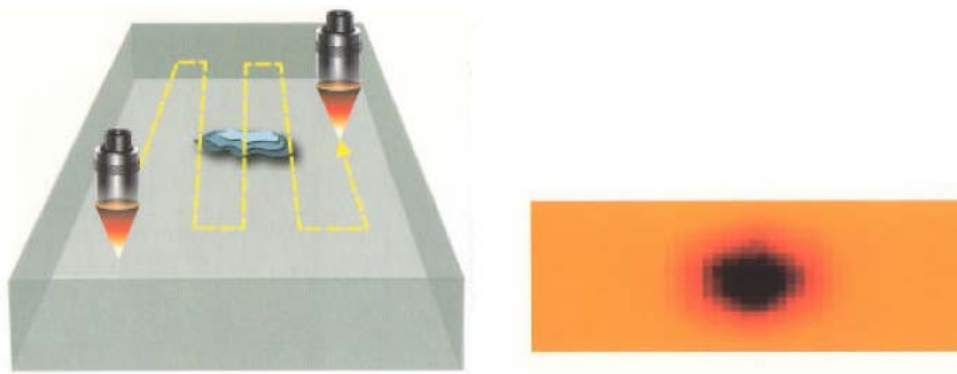


Fig. 2-33: Representación tipo C.

Las siguientes imágenes son una representación tipo C realizada por inmersión de una moneda (de su superficie) Fig. 2-34.

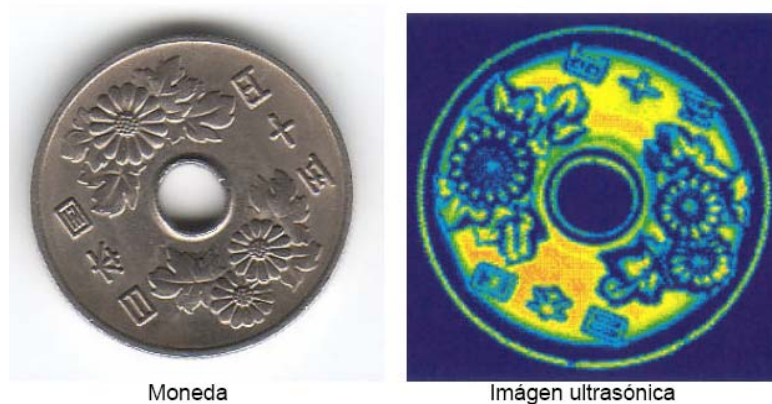


Fig. 2-34 Fotografía que muestra una comparación de una moneda cuando se le aplica una inmersión de para extraer una imagen ultrasónica.

## **2.3.6 Bloques patrones de calibración y de referencia**

### **2.3.6.1 Bloques de calibración**

Los bloques de calibración en el ensayo por contacto se usan para comprobar el funcionamiento del equipo ultrasónico y del transductor, y para efectuar la regulación del instrumento a fin de que éste se adapte a las condiciones del ensayo. Permite la verificación de distancias conocidas y relaciones angulares; verificación del ángulo y del punto de salida de haz en un palpador angular; verificación de la resolución del palpador, etc.

Los bloques de “calibración”, algunas veces son incorrectamente llamados bloques de “referencia” porque contienen discontinuidades artificiales de dimensiones y profundidades conocidas.

La Norma IRAM 723 “Bloques patrón para calibración de equipos”, define dos bloques de calibración para equipos de ultrasonido que utilizan las técnicas por reflexión de pulsos. Estos dos bloques (tipo B<sub>1</sub> y tipo B<sub>2</sub>, tienen como antecedentes a los propuestos por el International Institute of Welding (Documento V-461-71/OF) y adoptados por la International Organization for Standards (ISO/TC 44-Sec 345-44, F). En dicha norma se establecen las características del material, las dimensiones y tolerancias de fabricación.

La Norma IRAM-CNEA Y 500-1002, fija el procedimiento que debe seguirse para calibrar y ajustar las condiciones de funcionamiento y sensibilidad de los equipos (incluidos

palpador y correctores) utilizados en el ensayo de materiales por la técnica de reflexión, de manera que dichas calibraciones y ajustes sean reproducibles y comparables.

Se adjuntan dichas normas en el Apéndice I

### **2.3.6.2 Bloques normalizados de referencia.**

En el examen por ultrasonido, todas las indicaciones de discontinuidades (ecos) son generalmente comparados con bloques normalizados de referencia.

El bloque de referencia ideal debe ser un trozo de la misma pieza que vamos a verificar o bien debe estar constituido del mismo material.

Algunos bloques se utilizan para la prueba de contacto, otros para el ensayo por inmersión y otros se utilizan para ambos.

Aquí se presentaran algunos de los más comúnmente utilizados. Un bloque típico (Fig. 2-35) es el siguiente:

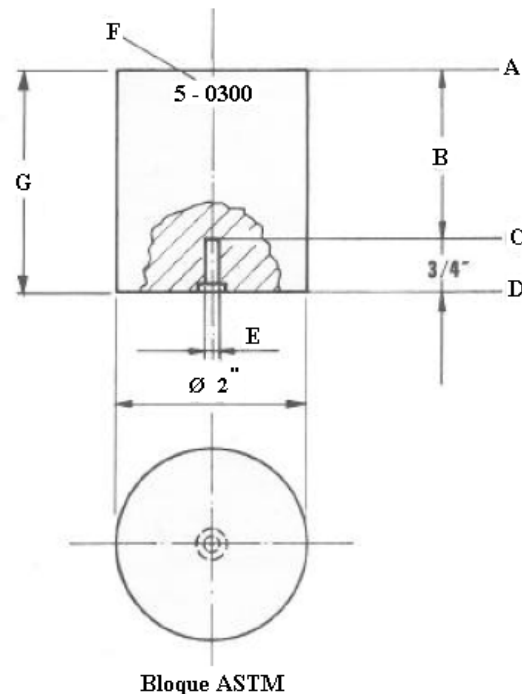


Fig. 2-35 En la figura se muestra un Bloque de calibración típico.



El bloque es cilíndrico.

**Donde:**

**E:** diámetro del orificio de fondo plano

**B:** Distancia entre la superficie de apoyo del palpador y el orificio de fondo plano.

**G:** altura total del bloque

La mayoría de los bloques tienen las siguientes características comunes:

1. Están fabricados con material cuidadosamente seleccionado.
2. El material debe tener una atenuación, tamaño de grano y tratamiento térmico apropiado y libre de fallas.
- 3.- Todas sus dimensiones deben ser mecanizadas en forma precisa.
- 4.- Todos los orificios deben ser de fondo plano y tener el diámetro especificado para ser un reflector ideal.
- 5.- Los diámetros y largos de los orificios laterales deben ser cuidadosamente controlados.

Normalmente son utilizados tres juegos de bloques de referencia:

- 1.- Bloques de referencia de área y amplitud.
- 2.- Bloques de referencia de amplitud y distancia.
- 3.- Juego básico ASTM de área-distancia y amplitud.

Los juegos de área - amplitud proveen patrones de diferentes áreas en la discontinuidad (orificio "E"), a la misma profundidad ("B").

Los bloques de distancia – amplitud proveen patrones con discontinuidades del mismo tamaño ("E") a distintas profundidades ("B").

El juego básico de patrones ASTM consiste en 10 bloques de 50 mm de diámetro (Tabla 2-3).

$G - B = 19 \text{ m}$

<b>Distancia “B”</b>		<b>Diámetro “E”</b>	
<b>Pulg.</b>	<b>mm</b>	<b>Pulg.</b>	<b>mm</b>
1/8	3.15	5/64	2
1/4	6.50	5/64	2
1/2	12.7	5/64	2
3/4	19	5/64	2
1 1/2	38	5/64	2
3	76	3/64	1.2
3	76	5/64	2
3	76	8/64	3.15
6	152	5/64	2
6	152	8/64	3.15

**Tabla 2-3 Se muestran el juego básico de patrones ASTM.**

## **2.4 Principios básicos de aplicación**

No hay quien se haya iniciado en el campo de la técnica de ultrasonido y no haya tenido que reconocer que, por muy profundos que sean los conocimientos técnicos adquiridos en la materia, inevitablemente surgen dificultades en la técnica de aplicación. La presente sección 2.4 de este trabajo informativo ha de servir para disminuir tales problemas, proporcionando datos de validez general en lo que respecta a la técnica de ensayo. Se recomienda, mediante ensayos prácticos preliminares con un equipo de ultrasonido, una dilucidación concreta de las relaciones que a continuación se describen. De este modo se podrá conseguir una cierta seguridad en el manejo de los palpadores y del equipo, que es imprescindible para el empleo en la práctica del ensayo.

Es de señalar que muchos de los ensayos necesarios pueden llevarse a cabo con los bloques normalizados internacionalmente (Normas DIN 54120 y 54122; IRAM 723).

### **2.4.1 Acoplamiento**

En el ensayo práctico es preciso asegurar el fácil pasaje de las ondas ultrasónicas desde el palpador a la pieza de ensayo y viceversa, para obtener resultados seguros y reproducibles. Por esto, se debe remover todo el aire entre ellos lo que se realiza con el mojado de la superficie de la pieza por medio de un líquido o una pasta. El acoplante óptimo será aquel

que, con un espesor de  $1/4''$ , tenga una impedancia acústica igual a la media geométrica de las impedancias en los dos medios adyacentes; esto se puede calcular como:

$$Z_c = \sqrt{(Z_1 \times Z_2)}$$

**Donde:**

**Z<sub>c</sub>:** impedancia acústica del acoplante.

**Z<sub>1</sub>:** impedancia acústica del medio 1.

**Z<sub>2</sub>:** impedancia acústica del medio 2.

La sustancia natural que más se aproxima a este acoplante ideal es la glicerina para muchos ensayos; pero la práctica ha demostrado que el agua o muchos aceites tienen casi la misma eficiencia. Así también se ha encontrado que el engrudo para papel de pared con antióxido puede servir como un buen acoplante, particularmente cuando el ensayo se hace sobre cabeza y en casos donde el aceite no es permitido.

Existen en el mercado diversos acoplantes pero, en la mayoría de los casos no aportan ninguna ventaja esencial. Comúnmente se usa aceite de máquinas en los ensayos manuales y agua (con algún inhibidor de corrosión) como acoplante en aquellos automatizados.

## **2.4.2 Superficie de la pieza de ensayo**

### **2.4.2.1. Rugosidad**

Si la rugosidad superficial de la pieza es del orden o superior a la longitud de onda, se producirá dispersión acústica debido a la refracción. La misma regla vale para la superficie posterior, donde la onda ultrasónica es dispersada por el fenómeno de reflexión. Como consecuencia de esto, la sensibilidad de indicación se reduce en comparación con otra pieza de igual tamaño, igual material, pero de superficie más lisas. Los efectos de reducción de la sensibilidad debida a la rugosidad puede ser compensada por el pulido de la superficie, o aumentando la ganancia del receptor. Obviamente, se debe ser cuidadoso para tener un buen acoplamiento, para esto se puede usar una capa protectora de neopreno resistente al aceite (llamada suela), colocada en el frente del palpador con algunas gotas de acoplante entre éste y el neopreno. Esta capa llenará las desigualdades de la superficie facilitando la transferencia del sonido y protegiendo, a su vez, a la cara del palpador contra el desgaste o

daños. Una parte de la energía ultrasónica será absorbida por la suela, pero el beneficio por el mejoramiento del acople, en muchos casos, es mayor que las pérdidas en el material de la suela.

#### **2.4.2.2 Curvatura**

Cuando se inspecciona por ultrasonido una pieza con superficies curvas, comúnmente se produce un ensanchamiento (divergencia) del haz.

Además de esto, el área donde el palpador contacta a la pieza para la transferencia del sonido es menor, por lo que de esta forma, sólo se utiliza una parte de la superficie del cristal. Estos dos factores son la razón por la cual se reduce la sensibilidad del ensayo, comparado con el caso de una superficie plana.

Es frecuente el uso de bloques adaptadores para obtener un área de contacto total entre el palpador y la superficie de la pieza. También, las ya mencionadas capas de neopreno pueden ser de utilidad. Es preciso puntualizar que con esto sólo se consigue aumentar el área de contacto sin lograr evitar la divergencia.

La magnitud de la divergencia depende de las velocidades del sonido en el acoplante y la pieza.

Este hecho se puede utilizar para la elección del material del bloque adaptador más conveniente.

Por medio de la elección de materiales adecuados es posible, teóricamente, lograr una focalización (Fig. 2-36); debería considerarse que las pérdidas por reflexión debido a las grandes diferencias de las impedancias sónicas del adaptador y el acoplante generalmente son mayores que la ganancia obtenida por la focalización.

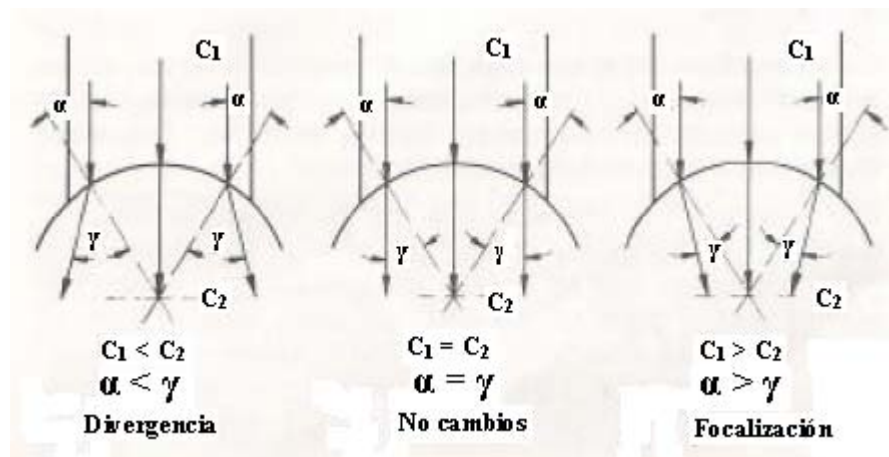


Fig. 2-36: Influencias en las velocidades del sonido en el adaptador (C<sub>1</sub>) y la pieza (C<sub>2</sub>).

En el área de acoplamiento, por supuesto, se generan una serie de ecos; esto puede perturbar la interpretación de las indicaciones en la pantalla del TRC. Por esta razón, el bloque adaptador deberá ser lo más corto posible, de tal forma que los múltiples ecos estén muy juntos unos de otros y produzcan el menor ensanchamiento posible del eco de emisión (particularmente cuando se use un material con alta atenuación, causando sólo unos pocos ecos múltiples), o se deberá hacer tan largo de tal forma que los ecos múltiples no ocurran en el rango del ensayo sobre la pantalla del TRC. En este caso el tiempo de recorrido en el adaptador deberá ser mayor que el tiempo de recorrido en la pieza.

$$l_a > l_w \times \frac{C_a}{C_b}$$

**Donde:**

**L<sub>a</sub>:** longitud del bloque adaptador.

**L<sub>w</sub>:** longitud del camino sónico de la pieza.

**C<sub>a</sub>:** velocidad del sonido en el bloque adaptador.

**C<sub>w</sub>:** velocidad del sonido en la pieza.

### 2.4.2.3 Recubrimiento

Se debe prestar especial atención a las superficies con recubrimientos. La regla general es que un recubrimiento firmemente adherido (por ejemplo capas de pinturas, cascarillas firmemente adherentes o capas de herrumbre) causarán un efecto perturbador pequeño; pero es aconsejable la limpieza de la superficie por medio de cepillo de acero, lima,

raspador o amolado cuando se encuentren depósitos exfoliados, esto es, cuando exista aire en los pequeños vacíos entre el depósito y la pieza. Estos espacios impiden en muchos casos la transferencia del ultrasonido.

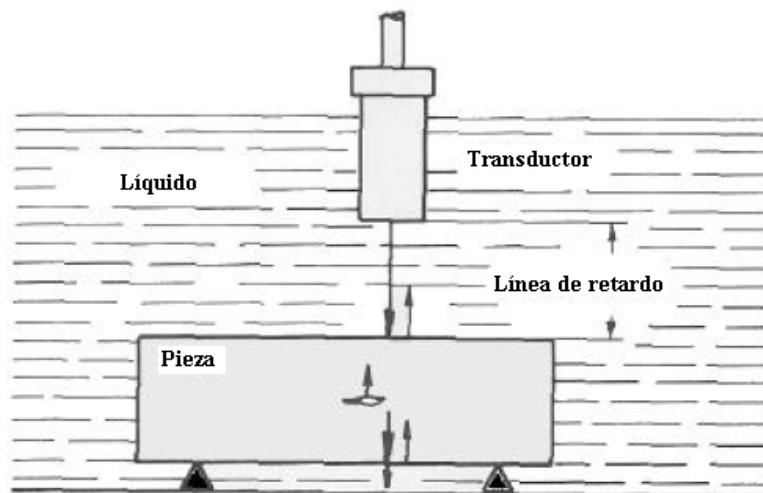
Superficies húmedas o grasosas en general no representan un inconveniente, la mayoría de las veces hasta ofrecen una ventaja a causa de que sus propiedades mejoran el acoplamiento.

### **2.4.3 Selección de los palpadores**

A primera vista parece ser difícil la selección del palpador óptimo por la gran variedad de unidades disponibles para un problema de ensayo particular. La elección será facilitada cuando, antes que nada, se fije el procedimiento de ensayo y luego, en el orden que sigue, la dirección de penetración del sonido, frecuencia de ensayo y tamaño del cristal.

### **2.4.5 Técnica de inmersión**

Para la inspección ultrasónica por el método de inmersión la pieza es totalmente sumergida en un líquido (comúnmente agua) y el haz es usualmente proyectado desde una cierta distancia. (Fig. 2-37).



a) Esquema de ubicación principal.

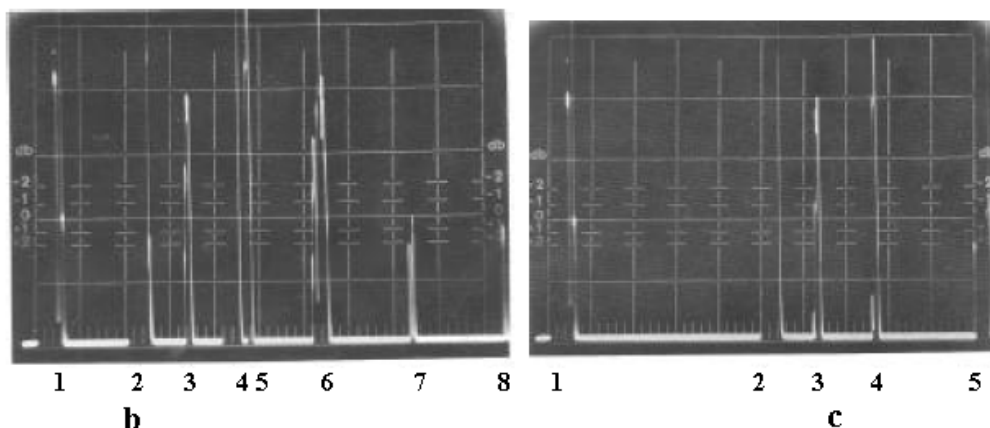


Fig. 2-37: a) recorrido en el fluido demasiado corto; b) Aparentes ecos múltiples (5) de la superficie dentro del rango de ensayo (de 2 a 4); c) Correcto dimensionamiento de la línea de retardo.

- 1: Eco de emisión.
- 2: Primer eco de la superficie superior.
- 3: Eco del defecto.
- 4: Eco de fondo (pared posterior).
- 5 a 8: segundo a quinto eco de la superficie superior.

El límite líquido-componente producirá, por este método, un eco de superficie el cual, con un correcto ajuste del rango de profundidad, marcará el cero en la pantalla del TRC en lugar del eco de emisión (en muchos casos no interesa la supervisión de camino en el fluido, así que, contrariamente a lo que muestra la Fig. 2-37 (c) la distancia entre los ecos N° 2 al N° 4 será la que se desarrollará a lo largo del total de la pantalla).

La ventaja de este método es el constante y uniforme acoplamiento.

Además, el eco de la superficie (entrada a la pieza de ensayo) es más angosto que el eco de emisión, permitiendo así una mejor resolución a pequeñas profundidades en la pieza.

Como en este caso, a diferencia de la técnica de contacto directo, no hay reflexión total (el medio líquido es considerablemente mejor conductor ultrasónico que el aire), y como una parte del sonido es reflejada y se propaga en el medio líquido, debe prestarse atención a las indicaciones provenientes de la zona del líquido pues pueden interpretarse como defectos inexistentes. Si en la técnica de inmersión se usan reflexiones en zig-zag, el rango de la onda ultrasónica será más corto que en la técnica de contacto directo (Fig. 2-38a) debido a

la conversión de onda y radiación de energía (ley de refracción) en cada paso (Fig. 2-38b). Por ejemplo, cuando en un ensayo de un tubo (Fig. 2-27), este se sumerge en un líquido, el eco de referencia de la circunferencia obviamente disminuirá o desaparecerá.

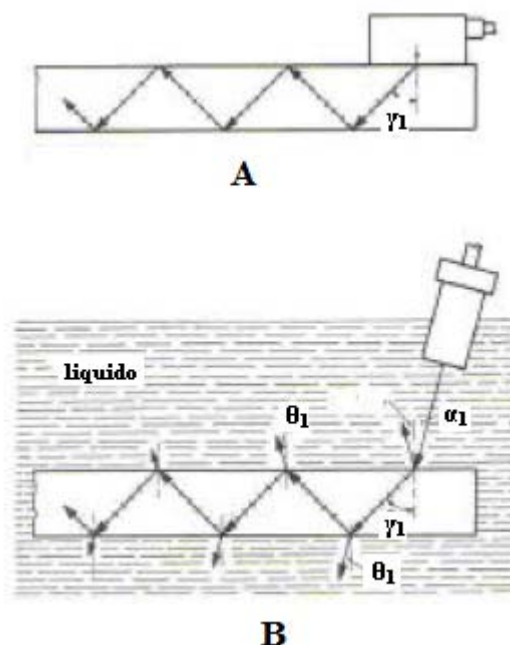


Fig. 2-38: a) Técnica de contacto; b) Técnica de inmersión.

Tampoco puede ser eliminada por la técnica de inmersión la influencia de la dispersión provocada por la rugosidad de la superficie, como falsamente se asume en muchos casos. Así, la técnica de inmersión tiene como principal ventaja un acoplamiento constante con la superficie de la pieza de trabajo. Otra ventaja es que dado que el palpador no está en contacto directo con la pieza, se pueden usar cristales más finos de alta frecuencia.

Se debe prestar atención a que la longitud del trayecto sónico en el fluido sea lo suficientemente grande para evitar que los ecos múltiples no caigan dentro del rango de ensayo.

En principio, las mismas reglas dadas para el retardo en los bloques (ver sección 2.4.2.2) son válidas aquí y muy importantes; así como se colocaba la longitud y la velocidad sónica en el bloque de retardo se debe colocar ahora los valores del trayecto previo en el fluido.



Es frecuente el uso de palpadores focalizados en esta técnica, los que ofrecen una alta sensibilidad de ensayo concentrada sobre un lugar relativamente pequeño. El modo de actuar de los focalizadores (“lentes”, Fig. 2-39) se deduce también de las leyes de refracción anexo 2-A5.

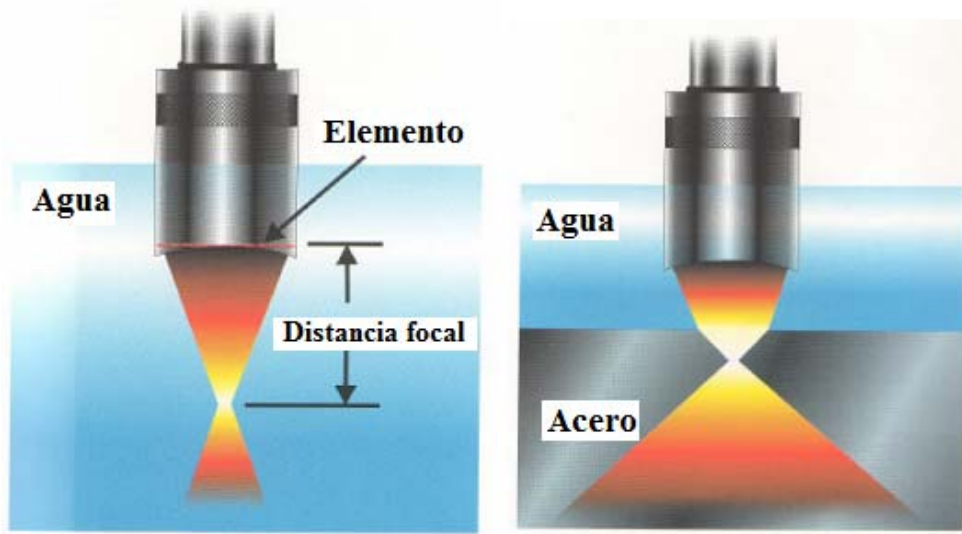


Fig. 2-39: Izquierda palpador con focalización (lente) en agua; derecha acortamiento de la longitud focal cuando el foco cae dentro de la pieza.

La elección para el uso de una lente cóncava o convexa, depende de las velocidades del sonido en el material de las mismas y en el fluido.

Si lo que se busca es focalizar en un punto, la curvatura de la lente deberá ser esférica Fig. 2-40a); si la focalización se busca en una línea, la lente será cilíndrica Fig. 2-40b).

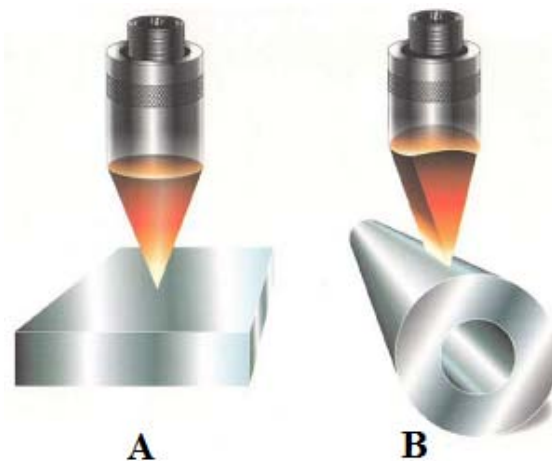


Fig. 2-40: Lentes acústicas. a) Focalizadas en un punto; b) Focalizadas en una línea.

Se debe considerar también que si la focalización se realiza dentro de la pieza y no en su superficie, habrá una refracción adicional en la superficie límite líquido / pieza. Este hecho causa un acortamiento (en el plano de la superficie) de la longitud focal, el cual es aproximadamente proporcional a la relación de velocidades.

#### **2.4.6 Interpretación de la presentación en la pantalla de TRC**

Como ya fue mencionado anteriormente, el haz electrónico, dentro del tubo de rayos catódicos, es deflectado en la dirección horizontal en una proporción lineal con el tiempo (generador de la base de tiempo); además de esto, es también deflectado en la dirección vertical cuando aparece un voltaje eléctrico adicional en el transductor (señal ultrasónica de emisión o recepción).

Principalmente lo que se mide es el tiempo de recorrido de la onda ultrasónica en la pieza.

De acuerdo con la relación:

$$c = \frac{a}{t}$$

Donde:

c: velocidad

a: distancia

t: tiempo

El espesor de la pieza o la distancia a un defecto puede ser calculada cuando se conoce la velocidad del sonido como:

$$a = t \times c$$

De allí que la pantalla del TRC puede ser calibrada directamente en longitud cuando la velocidad del sonido es conocida. Después de un ajuste correcto, se leerá directamente en las divisiones de la pantalla la longitud al reflector en mm.

Como referencia para esta lectura se toma el punto (en abscisas) sobre el cual el eco comienza a crecer (Fig. 2-41).

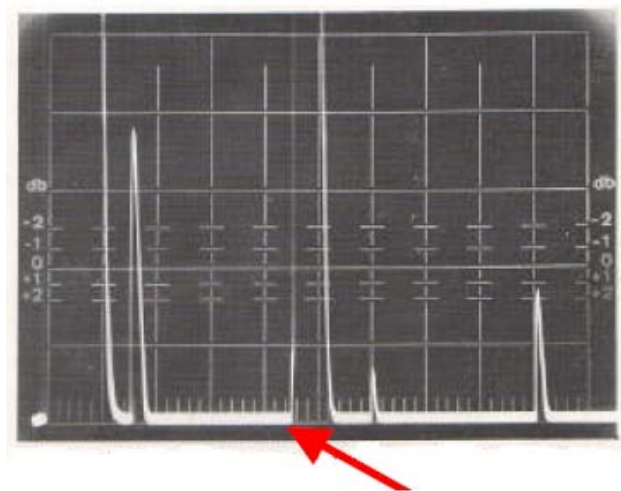


Fig. 2-41: El punto donde el eco se levanta (punto izquierdo en la base del mismo), es la referencia para su localización. Los cuatro ecos visibles (excepto el eco de emisión) están localizados en las divisiones: 1,5; 4,5; 6,0; 9,0.

#### **2.4.6.1 Indicaciones de defectos**

Los defectos son indicados de diferentes maneras, de acuerdo a sus formas, tamaños y ubicaciones dentro de la pieza.

#### **2.4.7 Determinación de la forma y tamaño de discontinuidades**

Dado cualquier discontinuidad como puede ser una cavidad en una fundición de hierro representará un obstáculo para la onda sónica.

La información de este defecto se puede obtener por medio de la onda reflejada en él (su eco) cuando se usa el método del eco o por medio de su sombra cuando se aplica el método de la medición de la intensidad del sonido.

Tanto el eco del defecto como de su sombra están basados en conceptos puramente óptico-geométricos por lo que la información que se puede obtener sólo será posible en los casos de discontinuidades grandes y regulares como por ejemplo en fisuras transversales planas y lisas en una barra donde la onda incidente se reflejará como en un espejo y con una sombra total detrás de ella.

Sin embargo, los defectos naturales pueden ser tan pequeños que produzcan fenómenos de difracción tanto en el eco que producen como en su sombra. Por esto las discontinuidades

se clasifican de acuerdo a sus dimensiones transversales con respecto al haz sónico en discontinuidades grandes y pequeñas.

Se aclara que la designación de “pequeño” no es una evaluación de la seriedad de la discontinuidad con respecto a la pieza en ensayo o lo que es lo mismo como puede afectar su aptitud para el servicio.

#### **2.4.7.1 Discontinuidades grandes.**

El tamaño de las discontinuidades grandes o sea aquellas que son mayores que la sección transversal del haz sónico a la profundidad del defecto se pueden estudiar por el método de los valores medios o método de exploración dinámica.

El estudio se realiza de la siguiente forma: se barre la pieza fuera de la zona donde se encuentra el defecto sin que existan interferencias de paredes laterales. Si se obtiene eco de fondo este se calibra a una determinada altura total de pantalla (por Ej. 80% ATP).

Cuando el haz comience a interceptar el defecto el eco de fondo comenzará a disminuir tomándose como proyección del defecto sobre la superficie de la pieza aquel punto en el cual el eco de fondo haya disminuido a la mitad del valor de la ATP calibrada anteriormente (en nuestro Ej. 40% ATP). En este punto el eje del haz se encontrará en el borde del defecto. Así se continúa delimitando el contorno de la falla. Ver Fig. 2-42.

En el caso de fallas alargadas en las cuales sólo la dimensión longitudinal sea mayor que el diámetro del haz se podrá determinar por este método solamente esta longitud.

Siempre es preferible trabajar con un haz de rayos lo más paralelos posibles esto es en el campo cercano en un palpador de gran diámetro o en el campo lejano con palpadores de pequeño ángulo de divergencia.

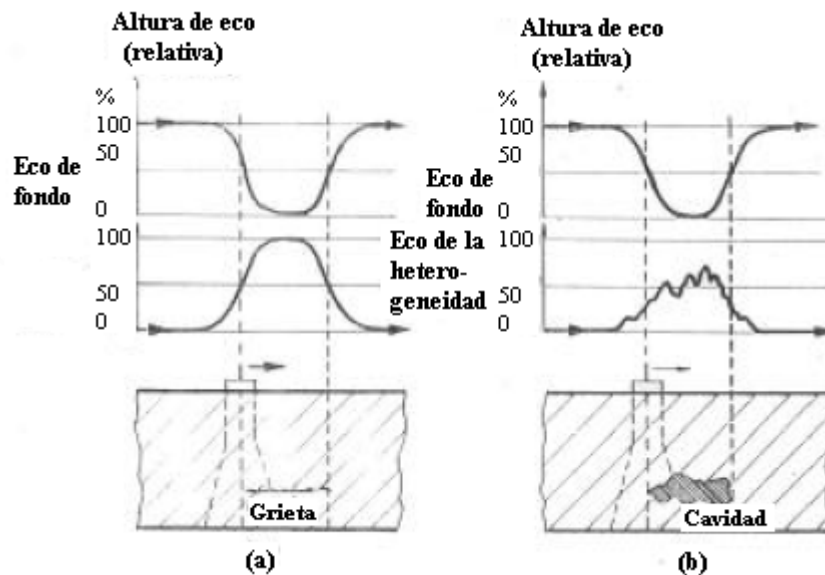


Fig. 2-42: Comportamiento del eco del defecto y del eco de fondo del barrido de un defecto grande.

Este método necesita del eco de fondo (superficies de barrido y de fondo paralelas) no siendo imprescindible la aparición del eco del defecto el cual podrá estar en posición oblicua o ser volumétrico (cavidad de contracción). De esta forma los resultados serán independientes de la ganancia del ensayo y de la orientación o forma del defecto.

Si por cualquier razón no se tuviera eco de fondo el ensayo se podrá realizar de la misma forma pero con el eco del defecto. En este caso los resultados obtenidos si dependerán del nivel de sensibilidad del ensayo (ganancia) y la orientación o forma del defecto. Es claro que cuando la discontinuidad en estudio sea paralela a la superficie de barrido los resultados serán reales pero en el caso de orientaciones o geometrías diferentes (falla oblicua o rugosidad) los resultados serán sólo aproximados al real dependiendo de que criterio de mínima altura de la indicación de su eco se adopte el que indicará dónde comienza la heterogeneidad.

De la misma forma se podrán medir por medio de palpadores angulares de 70° a 75° la profundidad de fisuras superficiales o la distancia de fisuras desde la superficie en el caso de que estas existan y sean grandes por ejemplo en forjados.

De ser posible la profundidad se medirá de ambos lados y los resultados promediados.

#### **2.4.7.2 Discontinuidades pequeñas**

La determinación del tamaño de defectos pequeños (área del defecto menor que la sección transversal del haz sónico) se puede realizar solamente midiendo el eco de máxima amplitud producido por el defecto. Este método se llama de determinación estática (sin movimiento del palpador) y luego se lo compara con discontinuidades conocidas.

Estas discontinuidades o reflectores pueden ser:

1) Discontinuidades naturales conocidas de idéntica naturaleza y morfología que las estudiadas.

Es el caso ideal pero también el más limitado pues se puede aplicar en casos muy particulares como por ejemplo en grandes producciones sistemáticas en donde se puede presentar un tipo determinado de defecto.

2) Discontinuidades artificiales de morfologías “similares” a las esperadas. También difícil de aplicar. Se suele utilizar en casos de estudios cuidadosos de las condiciones de ensayo.

3) Reflectores en forma de disco circular plano. Usualmente se utilizan orificios de fondo plano de distintos diámetros para obtener los resultados como una aproximación que dependerá de cuán alejado estemos de la realidad del defecto en estudio.

En general las discontinuidades naturales tienen superficies rugosas e irregulares lo que dará indicaciones de menor altura que un disco circular con igual superficie de reflexión por lo que el tamaño de una discontinuidad natural pequeña será igual o mayor que la de un disco circular perpendicular al haz sónico presente en la misma muestra y cuyos ecos sean de igual altura.

#### **2.4.8 Consideraciones en la construcción de piezas**

Cuando una pieza deberá ser ensayada ultrasónicamente por ejemplo por seguridad se deberá tener en cuenta esto desde su proyecto.

Tanto en los materiales provistos como en la manufacturación y procesos de maquinado los posibles eventuales defectos y su posicionamiento pueden ser previamente estimados en la mayoría de los casos por lo que deberían ser consideradas áreas adecuadas para el acoplamiento geometrías acústicas simples para una evaluación fácil de los resultados del ensayo. Ecos causados por la geometría de la pieza o por conversión de ondas pueden ser evitados con geometrías adecuadas. Sin embargo hoy en día, estos requerimientos no son satisfactoriamente considerados haciendo frecuentemente que el ensayo sea dificultoso, caro y hasta imposible de realizar.

### **2.4.9 Procedimientos generales del ensayo ultrasónico**

Las técnicas de ensayo, las cuales se encuentran en especificaciones y reglas, son los resultados obligados de los procedimientos que se mencionan más adelante. En muchos casos será necesario un diagrama en escala.

***Principio básico: La respuesta a la dirección de propagación del sonido en el arreglo de ensayo, depende de la existencia del defecto.***

En muchos casos, el defecto en la pieza es conocido (por ejemplo piezas reclamadas por haber sufrido corte o quebradura) o pueden ser, al menos estimada (área, forma, orientación) considerando las propiedades del material y los procesos sufridos.

La determinación de la dirección necesaria del haz sónico se debe efectuar desde la posición del defecto hacia la superficie; mientras que en un defecto volumétrico, principalmente aquellos esféricos, hay libertad en la elección de la dirección, un reflector cilíndrico podrá ser hallado desde todas las direcciones perpendiculares al eje del cilindro.

Existen mayores restricciones para un reflector plano el cual será detectable solamente desde una dirección (y la opuesta respectiva) perpendicular a su superficie o por la técnica en tándem (dos palpadores, uno emisor y el otro receptor). Las direcciones del sonido dependen obligatoriamente de estas consideraciones.

La siguiente consideración es que el área de interés de la superficie sea accesible para un adecuado acoplamiento. Si esto se da, la técnica de ensayo puede ser directamente deducida: según el ángulo con la superficie, incidencia del sonido perpendicular u oblicua; se pueden usar técnicas por contacto directo o por inmersión, en caso de la técnica de contacto y camino sónico corto, palpadores de doble cristal. Cuando se usa incidencia oblicua puede ser necesario calcular, dependiendo del material, los ángulos por medio de la ley de refracción. En la técnica de inmersión se debe tener cuidado de asegurarse que el tiempo de recorrido del sonido en el líquido nunca será menor que en la pieza para evitar ecos múltiples de interferencia en el rango de ensayo.

Cuando el área determinada para el ensayo sea inaccesible, o cuando exista peligro de indicaciones aparentes dentro del rango de ensayo, se buscarán otras técnicas. Se deberán considerar las siguientes posibilidades:

1. Si el área de la superficie es inaccesible, excepto que se puede llegar a la zona de interés por otra dirección del sonido (zig-zag), podrán ser aplicadas las reglas de reflexión para encontrar una nueva dirección la cual guíe a otra área de la superficie.
2. Elección de una dirección diferente del sonido, bajo circunstancias de no perpendicularidad al defecto. En caso de defectos cercanos a la superficie, se puede utilizar el efecto de borde, en donde ambas direcciones delantera y trasera de la onda ultrasónica casi coincide, lo cual permite el uso de un solo palpador.
3. Si el efecto de bordes no puede ser utilizado, se podrá también encontrar oblicuamente un plano del defecto en el cual se reflejará según las leyes de reflexión. La dirección perpendicular al plano del defecto es, en este caso, la bisectriz del ángulo. Esta técnica de ensayo es conocida como “técnica en tándem<sup>1</sup>”, y generalmente requiere dos palpadores separados, uno emisor y el otro receptor. Las consideraciones ya mencionadas para la superficie deben ser, en este caso, tenidas en cuenta para cada palpador.

---

<sup>1</sup> Conjunto de dos elementos que se complementan.



4. En casos de defectos con una fuerte dispersión se puede usar un arreglo semejante al indicado en 3 pero asimétrico. Esto es también llamada “técnica delta” que consta de un palpador transmisor y otro receptor separados.

Frecuentemente serán posibles varios arreglos de ensayo. En estos casos se recomienda seguir preferentemente lo que se describe a continuación:

1. Los defectos planos serán detectados perpendicularmente: técnica de ensayo simple y fácil de inspeccionar con un palpador.

2. Relacionado a la superficie de la parte bajo ensayo: en muchos casos el uso de palpadores normales (vertical) es más simple que el de los palpadores angulares, por lo que se les preferirá.

3. En lo posible se usará un camino sónico recto sin cambios de dirección dentro de la pieza.

4. Serán más favorables las técnicas de ensayos con un solo palpador por ser, generalmente, más simples que en tándem o delta.

5. Darán mayor seguridad y confianza los arreglos de ensayos en los cuales aparezca un eco de referencia en el fondo del rango de ensayo (por ejemplo pared posterior o eco de un borde).

6. Se deberán evitar los arreglos de ensayos que den indicaciones aparentes.

7. Por razones económicas, el volumen de la pieza a ensayar será el mayor posible al mismo tiempo que el área de inspección lo más pequeña que se pueda.

8. Cuando la orientación del plano de un defecto es desconocido, el ensayo deberá llevarse a cabo desde distintos sitios de la superficie. Ejemplo: defectos planos en barras: inspeccionar desde varias generatrices.

9. El método de transmisión será usado solamente en los casos cuando el método de pulso-eco falle.

Esta compilación contiene los más importantes puntos de vista para juzgar las soluciones a los distintos problemas de ensayos ultrasónicos. Con una poca experiencia se reconocerá fácilmente la técnica óptima de ensayo. Existe también un gran número de especificaciones, los que podrán ser aplicados por analogía en piezas similares, y los que facilitarán la solución de problemas.

### **3.0 Análisis por líquidos penetrantes**

---

La inspección por Líquidos Penetrantes es empleada para detectar e indicar discontinuidades que afloran a la superficie de los materiales examinados.

En términos generales, esta prueba consiste en aplicar un líquido coloreado o fluorescente en la superficie a examinar, el cual penetra en las discontinuidades del material debido al fenómeno de capilaridad. Después de cierto tiempo, se remueve el exceso de penetrante, mediante el uso de algún material absorbente (papel, trapo, etc.) y se aplica un revelador de color diferente al líquido penetrante, el cual generalmente es un polvo blanco, que absorbe el líquido que ha penetrado en las discontinuidades o aberturas superficiales y sobre la capa de revelador se delinea el contorno de ésta.

Actualmente existe una gran variedad de técnicas de inspección empleando este método; cada una de ellas ha sido desarrollada para una aplicación y sensibilidad específica. Así por ejemplo, si se requiere detectar discontinuidades con un tamaño de aproximadamente medio milímetro (0.012" aprox.), debe emplearse un penetrante fluorescente, removible por post-emulsificación y un revelador seco. Por otra parte, si lo que se necesita es detectar discontinuidades mayores a 2.5mm (0.100" aprox.), conviene emplear un penetrante contrastante, removible con agua y un revelador en suspensión acuosa.

Existen varias técnicas en el método de LP (ver tabla 3-1), quienes a su vez poseen sus ventajas, desventajas y sensibilidad asociada. En general, la elección de la técnica a utilizar dependerá del material en cuestión, el tipo de discontinuidades a detectar y el costo. En la siguiente tabla se muestran de forma general las técnicas de aplicación de los líquidos penetrantes (LP).

<b>Técnica</b>	<b>Sub-Técnica</b>
<i>Líquidos Visibles</i>	<i>Lavables con agua</i>
	<i>Lavables con solvente</i>
	<i>Posemulsificables</i>
<i>Líquidos Fluorescentes</i>	<i>Lavables con agua</i>
	<i>Lavables con solvente</i>
	<i>Posemulsificables</i>

Tabla 3-1: Clasificación de las técnicas de aplicación de los líquidos penetrantes.

### **3.1 Requisitos de la inspección por líquidos penetrantes**

Antes de iniciar las pruebas de Líquidos Penetrantes, es conveniente tener en cuenta la siguiente información:

1. Es muy importante definir las características de las discontinuidades y el nivel de sensibilidad con que se las quiere detectar, ya que si son relativamente grandes o se quiere una sensibilidad entre baja y normal, se recomienda emplear penetrantes visibles; pero si la discontinuidad es muy fina y delgada o se requiere de una alta o muy alta sensibilidad, es preferible emplear los penetrantes fluorescentes.
2. Otro factor de selección es la condición de la superficie a inspeccionar; ya que si es una superficie rugosa o burda, como sería el caso de una unión soldada o una pieza fundida, se debe emplear un penetrante líquido removible con agua. Pero si la superficie es tersa y pulida, es preferible emplear un penetrante removible con solvente. Finalmente cuando se requiere una inspección de alta calidad o con problemas de sensibilidad, se puede emplear un penetrante post-emulsificable.
3. Si el material a examinar es acero inoxidable, titanio o aluminio por ejemplo componentes aeronáuticos, o aleaciones de níquel (monel), entonces los penetrantes deberán tener un control muy rígido de contaminantes, como son los compuestos halogenados (derivados del flúor, cloro, bromo, yodo) o de azufre (sulfatos o sulfuros), ya que si quedan residuos de ellos, pueden ocasionar fracturas o fragilidad del material. Todos los proveedores de productos de alta calidad proporcionan un certificado de pureza de sus productos sin cargo adicional.
4. Si se trabaja bajo normas internacionales (Código ASME, API, AWS), los líquidos deben ser de los proveedores de las listas de proveedores aprobados o confiables

publicados por ellos. En caso necesario, se solicitará al proveedor una lista de qué normas, códigos o especificaciones de compañías cubren sus productos.

5. Una vez seleccionado uno o varios proveedores, nunca se deberán mezclar sus productos; como por ejemplo, emplear el revelador del proveedor A con un penetrante del proveedor B o un penetrante de una sensibilidad con un revelador de otra sensibilidad, aunque ambos sean fabricados por el mismo proveedor.

### **3.1.1 Aplicaciones.**

Las aplicaciones de los Líquidos Penetrantes son amplias y por su gran versatilidad se utilizan desde la inspección de piezas críticas, como son los componentes aeronáuticos, hasta los cerámicos como las vajillas de uso doméstico. Muchas de las aplicaciones descritas son sobre metales, pero esto no es una limitante, ya que se pueden inspeccionar otros materiales, por ejemplo cerámicos vidriados, plásticos, porcelanas, recubrimientos electroquímicos, etc.

## **3.2 Ventajas generales de los líquidos penetrantes**

- ☞ La inspección por Líquidos Penetrantes es extremadamente sensible a las discontinuidades abiertas a la superficie.
- ☞ La configuración de las piezas a inspeccionar no representa un problema para la inspección.
- ☞ Son relativamente fáciles de emplear.
- ☞ Brindan muy buena sensibilidad.
- ☞ Son económicos.
- ☞ Son razonablemente rápidos en cuanto a la aplicación, además de que el equipo puede ser portátil.(ver Fig. 3-1)
- ☞ Se requiere de pocas horas de capacitación de los Inspectores.

### **3.3 Limitaciones generales de los líquidos penetrantes**

- ☞ Sólo son aplicables a defectos superficiales y a materiales no porosos.
- ☞ Se requiere de una buena limpieza previa a la inspección.
- ☞ No se proporciona un registro permanente de la prueba no destructiva.
- ☞ Los Inspectores deben tener amplia experiencia en el trabajo.
- ☞ Una selección incorrecta de la combinación de revelador y penetrante puede ocasionar falta de sensibilidad en el método.
- ☞ Es difícil quitarlo de roscas, ranuras, huecos escondidos y superficies ásperas.

Por consiguiente, las áreas en las que se observe la presencia de líquido penetrante después de la aplicación del líquido absorbente, son áreas que contienen discontinuidades superficiales (grietas, perforaciones, etc.)

### **3.4 Descripción general del método**

Actualmente la técnica de LP, se puede resumir en los siguientes pasos:

#### **3.4.1 Limpieza inicial y secado:** (Fig. 3-a)

Consiste en limpiar perfectamente la zona de interés a ser ensayada de tal forma de dejar, las posibles discontinuidades, libres de suciedad o materiales extraños y su posterior secado.

#### **3.4.2 Aplicación del líquido penetrante y tiempo de penetración:** (Fig. 3-b)

Cubrir la superficie de interés con el LP y dejar transcurrir el tiempo necesario para permitir que el LP se introduzca por capilaridad en las discontinuidades.

#### **3.4.3 Limpieza intermedia:** (Fig. 3-c)

Se removerá el exceso de LP de la superficie, evitando extraer aquel que se encuentra dentro de las fallas. Esta remoción, podrá hacerse, según la técnica empleada, mediante:

- a) lavado con agua,
- b) aplicando un emulsionante y posterior lavado con agua, o
- c) mediante solventes.

### **3.4.4 Secado** (según la técnica)

Se secará la pieza del agente limpiador. Este paso puede ser obviado según la técnica utilizada.

### **3.4.5 Aplicación del revelador:** (Fig.3-d)

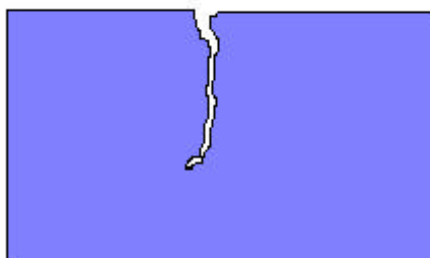
Sobre la superficie ya preparada se colocará el revelador en forma seca o finamente pulverizada en una suspensión acuosa o alcohólica, que una vez evaporada, deja una fina capa de polvo.

### **3.4.6 Inspección y evaluación:**

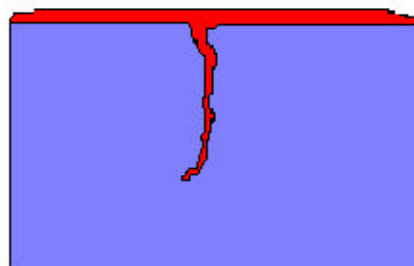
Esta fina capa de revelador absorberá el LP retenido en las discontinuidades, llevándolo a la superficie para hacerlo visible, ya sea por contraste o por fluorescencia (según la técnica empleada) las indicaciones podrán registrarse y evaluarse.

### **3.4.7 Limpieza final:**

Aunque los agentes químicos utilizados no deberían ser corrosivos de los materiales ensayados, se eliminarán sus restos para prevenir posteriores ataques.



**a) Limpieza Inicial**



**b) Aplicación del Penetrante**



**c) Remoción**



**d) Revelado**

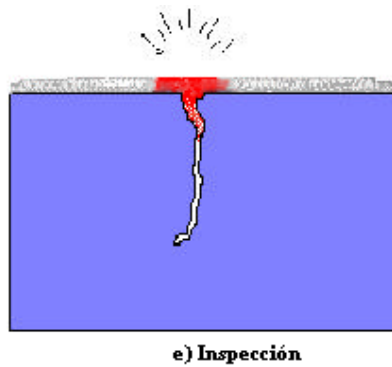


Fig. 3. Descripción grafica del proceso de la técnica de líquido penetrante (LP).

En general, existen dos principales técnicas del proceso de aplicación de los LP: la diferencia entre ambas es que, en una se emplean líquidos penetrantes que son visibles a simple vista ó con ayuda de luz artificial blanca y, en la segunda, se emplean líquidos penetrantes que solo son visibles al ojo humano cuando se les observa en la oscuridad y utilizando luz negra o ultravioleta, lo cual les da un aspecto fluorescente.

Estas dos principales técnicas son comúnmente conocidas como: Líquidos Penetrantes Visibles y Líquidos Penetrantes Fluorescentes. Cada una de estas, pueden a su vez, ser divididas en tres subtécnicas: aquellas en las que se utiliza líquidos removibles con agua, aquellas en las que se utiliza líquidos removibles con solvente y aquellas en las que se utilizan líquidos posemulsificables.

### **3.5 Clasificación de líquidos penetrantes**



Fig 3-1 Equipo portable de líquidos penetrantes.



### 3.5.1 Tipos de métodos penetrantes.

Norma IRAM-CNEA Y 500-1001 (1986)

#### Penetrantes

Penetrantes			
A	Penetrante Fluorescente	1	Lavables con agua
		2	Postemulsificable
		3	Removibles con solvente
B	Penetrante Coloreado	1	Lavables con agua
		2	Postemulsificable
		3	Removibles con solvente (Ejemplo de este tipo de penetrante en la fig. 3-6B)
C	Penetrante de uso dual	1	Lavables con agua
		2	Postemulsificable
		3	Removibles con solvente
D	Penetrante para usos Especiales		

Tabla 3-2: Clasificación de los penetrantes.

#### Removedores

**Removedores:** se agrupan en tres clases:

- a) agua
- b) emulsionantes
  - 1) de base oleosa
  - 2) de base acuosa
- c) disolventes

**Reveladores:** pueden ser.

- I) Polvos secos.
- II) Dispersiones y soluciones acuosas:
  - a) dispersión de polvo en agua.
  - b) solución de polvo en agua.
- III) Suspensión de polvo en disolventes volátiles no acuoso.
  - a) no inflamable.
  - b) inflamable. (ejemplo de este revelador ver figura 3-6C)

Tipo I fluorescente	
Método A	Lavable con agua (ASTM E-1200)
Método B	Postemulsificable lipofílico (ASTM E-1208)
Método C	Removible con solvente (ASTM E-1219)
Método D	Postemulsificable hidrofílico (ASTM E-1210)

Tipo II coloreados	
Método A	Lavables con agua (ASTM E-1418)
Método C	Removibles con solvente (ASTM E-1220)

Tabla 3-3: Norma ASTM: E 165-94.

Penetrante		Removedor del penetrante en exceso		Revelador	
Código	Designación	Código	Designación	Código	Designación
<b>A</b>	Fluorescente	<b>A</b>	Solvente líquido	<b>A</b>	Seco
<b>B</b>	Coloreado	<b>B</b>	Agua y solvente	<b>B</b>	Acuoso
<b>C</b>	Flúor y color	<b>C</b>	Agua	<b>C</b>	No acuoso
		<b>D</b>	Emulsificadores hidrofílico (base agua)		
		<b>E</b>	Emulsificador lipofílico (base aceite)		

Tabla 3-4: Norma DIN 54 152 (1989)

Designación	Método	Símbolo
Fluorescente	Lavable con agua	<b>FA</b>
	Postemulsificable	<b>FB</b>
	Removible con solvente	<b>FC</b>
Coloreado	Lavable con agua	<b>VA</b>
	Removible con solvente	<b>VC</b>

Designación	Método	Símbolo
Método de revelado seco	Revelador seco	<b>D</b>
Método de revelado húmedo	Revelador húmedo acuoso	<b>W</b>
	Revelador húmedo no acuoso	<b>S</b>
Método sin revelado	Sin revelador	<b>N</b>

Tabla 3-5: Norma JIS Z 2343 (1982)

### **3.5.1.1 Penetrantes lavables con agua. (Método A)**

Se utilizan a los penetrantes lavables con agua para comprobar para saber si hay grietas en una amplia gama de usos sensibles. Estos penetrantes despiden luz fluorescente de un color amarillo verdoso bajo radiación ultravioleta. Además se utilizan las fuentes de luz negras con la longitud de onda máxima de 365 nanómetros tales como luz negra. (Ver procedimiento de aplicación remítase al anexo 4).

### **3.5.1.2 Penetrantes fluorescentes emulsivos. (Método B, C, D)**

Los penetrantes fluorescentes emulsivos se utilizan para una amplia gama de usos sensibles y se formulan para ser impermeables al agua para asegurar contra su excesivo lavado de defectos. Los penetrantes emulsivos requieren el uso de un emulsor lipofílico o de un emulsor hidrofílico. Cada penetrante despide luz fluorescente un color amarillo verdoso brillante bajo radiación ultravioleta. El uso de una fuente de luz negra, con la longitud de onda máxima de 365 nanómetros, tales como la luz negra es recomendable. Cada penetrante se formula para producir indicaciones fluorescentes estables del calor bajo condiciones de secado normales. (Detalle del procedimiento de aplicación en anexo 5,6 y 7)

## **3.6 Principios físicos del ensayo**

### **3.6.1 Propiedades de líquidos penetrantes.**

#### **3.6.1.1 Tensión superficial:**

Como ya se señaló, el principio en el cual se basa esta técnica no destructiva es en la capacidad de que el líquido pueda penetrar (por capilaridad, no por gravedad) y ser retenido en las discontinuidades como fisuras y poros abiertos a la superficie.

No existe una característica física que, por sí sola, determine terminantemente la bondad de un líquido penetrante.

Las principales características físicas a considerar son:

La tensión superficial es la forma de cohesión de las moléculas de la superficie del líquido en función de la cual, a igualdad de volumen, asume la forma correspondiente a la mínima superficie compatible con el vínculo externo. La forma de la gota simplifica este concepto

La tensión superficial esta definida como una fuerza que actúa sobre toda “saliente” en una superficie acabada. (Fig 3-2)

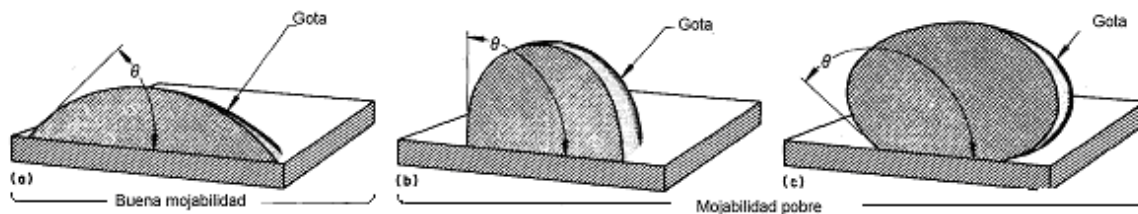


**Fig. 3-2: Tensión superficial.**

Un ejemplo de cómo actúa la tensión superficial es una pompa de jabón. Esta consiste en una lámina de agua jabonosa que tiende a asumir la superficie mínima que es la forma esférica. La tensión superficial, como la viscosidad, dependen de la temperatura y disminuyen con el aumento de la energía cinética de las moléculas del líquido. La tensión superficial de los líquidos penetrantes es normalmente de 25 a 30 dinas/cm La tensión superficial también es función del estado superficial.

### **3.6.1.2 Mojabilidad o poder de humectación**

Por mojabilidad se entiende a la propiedad de un líquido de expandirse adhiriéndose a la superficie de un sólido. Esta depende de la interacción del líquido con la fase sólida y gaseosa en la que se encuentra. La mojabilidad está estrechamente ligada a la tensión superficial, y está determinada por el ángulo “ $\Theta$ ” de contacto con la superficie. Ver Fig. 3-3 en donde se muestran tres condiciones intermedias con  $\Theta < 90^\circ$  ;  $\Theta = 90^\circ$  ,  $\Theta > 90^\circ$



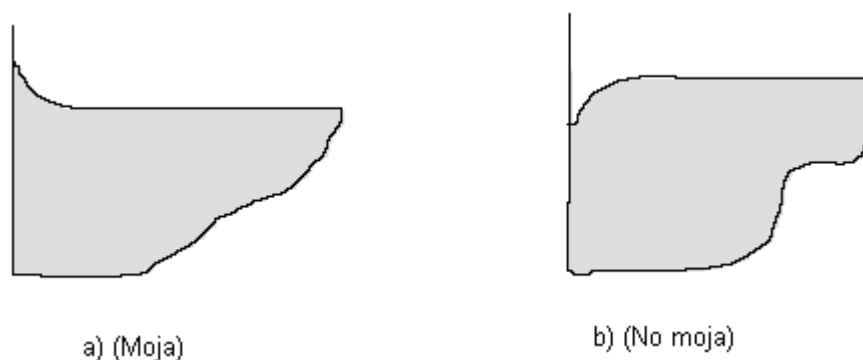
**Fig. 3-3: a) buena mojabilidad, b) y c) escasa mojabilidad.**

Un líquido penetrante de buena calidad debe necesariamente poseer un bajo ángulo de contacto a fin de asegurar una buena mojabilidad de la superficie de examen y una óptima penetración en las discontinuidades.

Es fácilmente demostrable que, con solamente una buena tensión superficial, no es suficiente para garantizar la capacidad de penetración y en consecuencia la calidad de un

producto. Por ejemplo el agua, teniendo una alta tensión superficial, posee un ángulo de contacto grande que la hace escasamente penetrable. Si a ésta se le agregan agentes humectantes, el ángulo es drásticamente reducido y aunque se obtiene una consiguiente reducción de la tensión superficial, el agua podrá resultar en un buen penetrante.

Ya se dijo que la interacción de las partículas de líquido con las partículas sólidas ejerce influencia sobre la forma de la superficie del líquido dentro del recipiente. Si una gran cantidad de líquido está contenido en un gran recipiente, la forma de su superficie está determinada por el peso lo que engendra una superficie plana y horizontal en su parte media. Sin embargo junto a las paredes del recipiente, la superficie del líquido adquiere una curvatura que se llama “menisco”, y que puede ser cóncavo cuando el líquido moja la superficie ( Fig.3-4a) o convexo para los que no la mojan (Fig.3-4b)



**Fig. 3-4: Menisco que muestra si un líquido moja o no.**

### **3.6.1.3 Capilaridad:**

Se ha visto que la superficie de un líquido contenido en un recipiente presenta cierta curvatura en las fronteras del líquido y las paredes sólidas del recipiente. Sobre el resto de la superficie, conserva una forma plana. Pero si el tamaño total de la superficie es pequeño, toda la superficie del líquido “sentirá” la influencia de las paredes y este aparece curvo en toda su extensión. En este caso, cuando las dimensiones del recipiente en el que se encuentra el líquido o, en el caso más general, si la distancia entre las superficies limitantes del líquido es comparable al radio de curvatura de su superficie, a estos recipientes se les llamará “capilares”. A los fenómenos que tienen lugar dentro de estos recipientes se denominan “fenómenos de capilaridad” o simplemente “capilaridad” La capilaridad viene

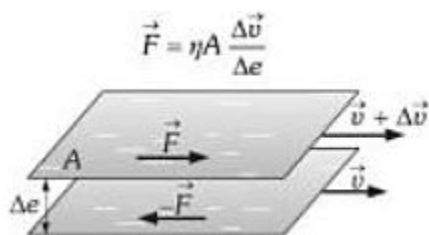
generalmente entendida cuando se analiza el particular fenómeno por el cual, cuando se sumerge un tubo capilar en un líquido, se obtiene una diferencia de niveles entre el líquido contenido en el tubo y aquel que permanece afuera, formando el líquido un menisco.”

El desnivel obtenido podrá ser positivo o negativo, según el ángulo de contacto y la mojabilidad del líquido.

El fenómeno de la capilaridad constituye la base de la acción penetrante de un líquido en el interior de las discontinuidades.

### 3.6.1.4 Viscosidad

La viscosidad de un fluido, es una propiedad física debida a la interacción interna de las moléculas. Es la resistencia que presentan las capas de los líquidos para deslizarse unas sobre otras (Fig 3-5). El *coeficiente de viscosidad* “ $\eta$ ” es el parámetro que caracteriza la viscosidad.



Donde:

F: fuerza aplicada sobre las capas del líquido

A: área de superficie en contacto

V: Velocidad constante

$\Delta e$ : Distancia entre capas

$\Delta V$ : Diferencia de velocidades

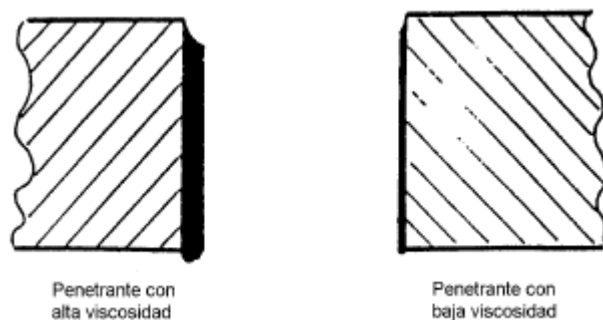
Fig. 3-5: Las demás capas se cizallan, desplazándose entre sí en forma similar a como se acomodan los naipes de una baraja cuando se extienden sobre una superficie.

De por sí la viscosidad no influye directamente sobre la valoración cuantitativa del penetrante, pero asume una particular importancia en la fase operativa del ensayo. En otras palabras, el penetrante debe poseer la suficiente fluidez para entrar con facilidad y rapidez en los defectos tanto como para entrar y salir con rapidez en los defectos conforme sea requerido. Al mismo tiempo debe ser lo suficientemente viscoso como para no ser extraíble fácilmente de las discontinuidades en la etapa de remoción del exceso, ya sea por la acción directa el agua (penetrantes lavables con agua) o asociarse al emulsificador (postemulsificables).

La eficacia global del proceso puede ser considerada mayor o menor según el riesgo de pérdida de las indicaciones en la etapa de remoción del exceso según se considere

prevaleciente o no sobre la velocidad de penetración en la discontinuidad y sobre la eficiencia del revelado.

Los penetrantes de alta viscosidad (tixotrópicos) son usados para aplicaciones en spray o electrostáticamente por cuanto tienen una lenta velocidad de drenaje. Son particularmente usados sobre superficies verticales. Aquellos con baja viscosidad son usados para aplicaciones por inmersión donde se requiere un rápido drenaje para disminuir el consumo de penetrante y la contaminación del emulsificador y /o el agua. Es fácilmente intuible como la viscosidad de un penetrante es un factor determinante en la velocidad de penetración en la discontinuidad. Por tanto productos con alto valor del “Parámetro de Penetrabilidad Cinemática” PPC, (baja viscosidad) necesitará de un tiempo menor de penetración con la consiguiente reducción del tiempo de inspección. Por otra parte, un penetrante caracterizado por una baja viscosidad “escurrirá” rápidamente de la superficie en examen, especialmente si esta es vertical o inclinada. Este fenómeno incidirá negativamente tanto sobre el accionar del líquido como en la confiabilidad del resultado del ensayo. En consecuencia, si el caso particular exige el uso de LP de baja viscosidad, será preferible aplicar la técnica de inmersión para asegurar una suficiente cantidad de penetrante sobre la superficie a controlar. En el caso de usar un producto con alta viscosidad, se recomienda hacer alguna evaluación económica. La cantidad de penetrante retenido sobre la superficie del componente resulta proporcional a la viscosidad del producto. Esto se traduce en un mayor consumo especialmente en los casos en los cuales se emplea la técnica por inmersión. Fig.3-6



**Fig. 3-6: La cantidad de penetrante retenido sobre la superficie del componente resulta proporcional a la viscosidad del producto.**

### **3.6.1.5 Densidad:**

Siendo generalmente compuestos orgánicos oleosos, los LP poseen generalmente un Peso específico (PE) muy bajo. La densidad y el PE del producto no inciden en forma directa sobre la sensibilidad y confiabilidad del ensayo. Especialmente en el caso en el cual la inspección se efectúa con la técnica de inmersión, son más adecuados los penetrantes con  $Pe < 1$  (comercialmente entre 0,85 a 0,95). Esta exigencia deriva principalmente del hecho que una eventual contaminación del LP con agua, usada durante el control, no producirá consecuencia irreparable, por cuanto al ser el Pe de la misma mayor que la del líquido penetrante, se depositará en el fondo del contenedor, facilitando así la separación del agua. La densidad aumenta con el aumento de la temperatura debido a la evaporación de los componentes más volátiles que generalmente son más ligeros.

La densidad para líquidos se mide  $gr/cm^3$  y para reveladores en polvos secos en g/ litro dando, esto en este último caso idea de su granulometría o finura. En reveladores secos, la densidad debe ser normalmente menor a 200 g/litro.

### **3.6.1.6 Volatilidad**

Por volatilidad se entiende la propiedad físico - química de algunos componentes, constituyentes de la mezcla líquida, de pasar al estado gaseoso (evaporarse) más o menos fácilmente de la superficie en examen. La consecuencia inmediata de la volatilidad, es la variación de la composición química (y por lo tanto de la tensión superficial, mojabilidad, viscosidad, densidad, punto de inflamabilidad, etc.) de la mezcla original. La volatilidad es función de la temperatura y la presión a la cual se encuentra la mezcla penetrante. Es evidente que para un líquido penetrante ideal, la volatilidad deberá ser la mínima posible e igual o similar para cada componente con el objeto de mantener la composición química original. Un líquido muy volátil no resulta económicamente competitivo por cuanto, si se usa en un contenedor abierto para la técnica por inmersión, tiende continuamente a evaporarse con la consiguiente pérdida de sus características. Cuando se trata de reveladores húmedos no acuosos se necesita ajustar la volatilidad del material para asegurar una determinada velocidad de secado.



### **3.6.1.7 Punto de inflamación**

Es la temperatura mínima a la cual el líquido penetrante debe ser calentado, en condiciones normalizadas de laboratorio, para producir vapor en cantidad suficiente como para formar una mezcla inflamable. En la inspección se requieren penetrantes con alto punto de inflamabilidad que, además de poseer un bajo grado de volatilidad, aseguran ajustarse a las normas de seguridad vigentes. Tales exigencias son particularmente requeridas cuando se utiliza la técnica por inmersión, donde los recipientes están abiertos al aire.

Su medición, además, provee una indicación con respecto a la exactitud de la formulación del producto y sus desviaciones no debe exceder el  $\pm 10\%$  del valor medio, dentro de diferentes partidas. La medición del Punto de inflamabilidad se hace con el aparato de Tag (Norma IRAM o ASTM D-56) cuando su valor es inferior a  $80^{\circ}\text{C}$  y con el método Cleveland de vaso abierto (Norma IRAM 6555 ó ASTM D-92) para Puntos de inflamación mayores de  $80^{\circ}\text{C}$ .

## **3.7 Otros tipos de penetrantes**

- ☞ Penetrantes tixotrópicos: alta viscosidad.
- ☞ Penetrantes fluorescentes base acuosa: para inspeccionar tanques  $\text{O}_2$ .
- ☞ Penetrantes coloreados o Fluorescentes: sin S, halógenos, etc.
- ☞ Penetrantes coloreados fluorescentes: dispersables en  $\text{H}_2\text{O}$  para ensayos de fugas en grandes recipientes.
- ☞ Penetrantes Fluorescentes: sin aceites para gomas y plásticos.
- ☞ Penetrantes Fluorescente base aceite: para aceites de refrigeración.
- ☞ Penetrantes Para superficies calientes.
- ☞ Penetrantes coloreados: uso comestible.
- ☞ Penetrante micro encapsulados.
- ☞ Penetrantes tipo By- Lux Penetrant: no por capilaridad. Cambia de color neutro a rojo brillante con  $\text{H}_2\text{O}$  o humedad.

## **3.8 Mecanismos del revelado**

El revelado consiste en la aplicación, sobre la pieza en ensayo, de una capa muy fina del polvo revelador. La función del revelador es la de absorber y llevar al penetrante, atrapado en las discontinuidades, hacia la superficie, aumentando así la visibilidad de las indicaciones. La acción del revelador es una combinación de los efectos de disolución, absorción y adsorción (Fig. 3-7).

Los reveladores se pueden clasificar en tres tipos generales con sus subdivisiones:

I) Polvos secos.

Sólo se usan con líquidos penetrantes fluorescentes dado que con LP coloreados no producen el suficiente contraste.

II) Dispersiones y soluciones acuosas (Húmedos acuosos):

a) dispersión de polvo en agua.

b) solución de polvo en agua.

III) Suspensión de polvo en disolventes volátiles no acuoso (Húmedos no acuosos).

a) no inflamable (solventes clorados).

b) inflamable (solventes no clorados).



**Fig 3-7: Esquema que muestra como se aplican los líquidos limpiadores, penetrantes y reveladores en un ensayo de líquidos penetrantes.**

El conjunto de inspección utilizada en un ensayo de líquidos penetrantes puede observarse en la Fig. 3-8.



**Fig. 3-8: limpiador (A), penetrante (B) y revelador (C).**

### **3.8.1 Granulometría de los polvos:**

La composición química de los reveladores es un secreto de los fabricantes en cuanto a los porcentuales de las mezclas de los diversos polvos y en ella de su granulometría que puede ser de 2 a 4 micrones.

## **3.9 Formulación básica de líquidos penetrantes con base oleosa y no oleosa.**

No es fácil clasificar a los líquidos penetrantes dado la variedad que existe pero, sin tener en cuenta los productos especiales se puede esbozar una clasificación en función al producto base que contienen: Penetrantes en base oleosa (estándar):

Tienen una base oleosa que es una mezcla de hidrocarburos parafínicos (inodoro), nafténicos (inodoro) y aromáticos (no inodoro pero empleado por ser un excelente solvente del pigmento). Existen actualmente productos con base de solventes sintéticos alifáticos que son biodegradables. No deben ser usados para inspeccionar recipientes que contengan oxígeno líquido porque se pueden producir explosiones (oxígeno: comburente; penetrante base oleosa: combustible).

Penetrantes en base no oleosa (inorgánicos):

Son de base acuosa con pigmentación inorgánica. Poseen menor sensibilidad que los de base oleosa por lo que deben ser empleados donde no es necesario alta sensibilidad. Son de bajo costo. Este tipo de penetrante debe ser usado en el control de recipientes de oxígeno líquido para prevenir explosiones. Otros tipos de penetrantes pueden ser: Penetrantes para alta temperatura: Tienen base cerosa con aditivos de solventes no inflamables. Poseen menor sensibilidad que los oleosos y se emplean normalmente para temperaturas máximas de 200 a 250 ° C.

Aditivos y acondicionadores: es difícil establecer la función cualitativa y cuantitativa de cada uno pero se los puede subdividir en:

- Copulantes: sirven para mantener el pigmento en solución.
- Plastificantes: mantienen estable la solución con los cambios de temperatura.
- Tensoactivos: confieren una adecuada mojabilidad y tensión superficial al penetrante. En general son sales de sodio y potasio de ácidos grasos

- Solventes y emulsificadores: hacen que el penetrante sea más o menos lavable con agua. Según el tipo de solvente, el penetrante puede resultar mejor lavarlo en frío o en caliente, como también según sea en base oleosa o cerosa. Existen límites, por parte de las normativas, sobre el contenido de algunas sustancias que pueden inducir corrosión o dañar la pieza en examen.  
El Código ASME V (T640) ED 1992 indica que es necesario analizar el contenido de azufre para aleaciones en base níquel, mientras que en el control de aceros inoxidables austeníticos y aleaciones de titanio se deberán analizar el contenido de halógenos.

### **3.9.1 Formulaciones básicas**

#### **3.9.1.1 Removedores**

Hay dos tipos básicos de removedores, los inflamables y los no inflamables.

Los primeros están esencialmente libres de alógenos pero son potencialmente peligrosos. Los segundos, que son ampliamente usados, son halogenados lo que los puede hacer inapropiados para algunas aplicaciones.

Las características físico - químicas de los agentes de remoción varían considerablemente de acuerdo al penetrante usado y al tipo de material en examen. Una formulación aproximada es la siguiente:

**Solvente no inflamable:** solventes clorados estabilizados para la industria convencional.

**Solventes inflamables:** destilados volátiles de petróleo, alcoholes volátiles y cetonas para la industria nuclear.

#### **Solventes de petróleo:**

- ☞ hidrocarburos de petróleo de diversas naturalezas: aromáticos y alifáticos.
- ☞ Aceites minerales: de un grado de pureza particular.
- ☞ Cosolventes: glicol-eter comprimido.

#### **Derivados sintéticos:**

- ☞ tensoactivos modificados.
- ☞ tensoactivos orgánicos modificados.
- ☞ Bases diversas con oxido de etileno y/o propileno.

#### **Inhibidores de corrosión:**

- ☞ Tipo A : soluble en aceites.

☞ Tipo B: soluble en agua.

De cualquier modo, independientemente de su formulación, deberá poseer un alto punto de inflamación que respete las normas de seguridad y una alta volatilidad a fin de ser eliminado de la pieza antes de aplicar el revelador.

### **3.9.1.2 Emulsificadores.**

Aunque no se conoce exactamente su composición química (reservada por el fabricante) los emulsificadores lipofílicos se puede decir que la base de la formulación es la siguiente:

- Producto base:

Tensoactivos, hidrocarburos de petróleo y aminas.

- Aditivos:

Glicol, ácidos grasos y aceites vegetales.

- Pigmentos:

Pigmentación roja (colorantes orgánicos) o fluorescentes

Así como en el caso anterior los emulsificadores hidrofílicos tienen la siguiente formulación base aproximada:

- Producto base (80 - 90 %):

El producto base son mezclas de tensoactivos no iónicos y glicol (alcoholes superiores)

- Aditivos (15 - 20 %):

Son esencialmente inhibidores de corrosión y bactericidas.

- Pigmentos

### **3.9.1.3 Reveladores**

El revelador es el agente que pone de manifiesto los sitios en los que ha tenido lugar una retención de líquido penetrante.

Actúa como un papel secante que extrae el líquido de la discontinuidad, y reduce el tiempo necesario para que la indicación se haga visible.

Actúa como un papel secante que extrae el líquido de la discontinuidad, y reduce el tiempo necesario para que la indicación se haga visible.

La absorción del penetrante por el revelador se debe a la presencia de gran cantidad de intersticios de pequeñas dimensiones que separan los granos de polvo de revelador. Por capilaridad el líquido asciende a través del revelador y se difunde en la capa superficial por

lo que es indispensable para visualizar los defectos pequeños que la capa de revelador sea muy fina.

Además, el revelador contribuye a aumentar la visibilidad de las indicaciones por ser de un color opuesto al del penetrante y proporcionar un fondo sobre el que contrasta el color del penetrante.

#### **3.9.1.3.1 Composición y estado de reveladores**

Los reveladores deben poseer las siguientes características:

- Tener una elevada capacidad absorbente.
- Debe de estar finamente dividido (polvo muy fino) para conseguir una buena definición del contorno de las indicaciones. También así aumenta su capacidad de absorción.
- Ser fácilmente dispersables de tal forma de formar una capa uniforme sobre la pieza de ensayo.
- Dar un buen contraste con la indicación. De modo particular el revelador debe ser:
  - Blanco para líquidos penetrantes coloreados.
  - No fluorecer para líquidos penetrantes fluorescentes.
- Tener buena mojabilidad para que el líquido retenido en las indicaciones se pueda expandir sobre la superficie de las partículas.
- Adherencia a la superficie en ensayo.
- De fácil aplicabilidad, uniforme y rápido; baja velocidad de sedimentación para los reveladores líquidos en suspensión.
- Ser fácilmente removibles después del examen.
- Químicamente inerte (PH=7)
- No tóxico
- No inflamable.

La composición química de los reveladores, como todos estos productos, es secreto de los fabricantes especialmente los porcentuales y granulometrías usadas pero en líneas generales podemos decir que la composición es la siguiente para: En líneas generales podemos decir que la composición es la siguiente:

1) Reveladores secos: polvo de sílice amorfa o coloidal (la cristalina está prohibida), polialcoholes, carbonatos insolubles, con una granulometría entre 2 y 4 micrones. Pueden

contener pequeños porcentuales de polvo de talco, silicatos, sales de calcio y polvos de titanio (confieren peso para su decantación sobre la pieza).

2) Reveladores líquidos:

- Líquido soporte:
- Agua para el revelador acuoso.
- Solventes halogenados (donde no existe prescripciones sobre el contenido de alógenos) o alcohol isopropílico.
- Polvos: con una concentración de 0.04 – 0,1 Kg por cada litro de líquido constituidos de: reveladores en suspensión: sílice amorfa o coloidal (la cristalina está prohibida por cancerígena), polialcoholes, carbonatos insolubles.
- Reveladores en solución: sales de calcio (por ejemplo silicatos).

Granulometría. La granulometría aproximada de las partículas de polvos es de alrededor de 2 a 4 micrones dependiendo de la calidad del revelador.

### **3.10 Procesamiento**

La diversidad de parámetros que intervienen en el proceso de ensayo hace necesario que se precise en los documentos de control las condiciones de ensayo a adoptar, en función principalmente de:

El material y la geometría de las piezas.

Las exigencias de servicio o de funcionamiento de las piezas.

Los medios disponibles para la ejecución del ensayo no destructivo.

Los requisitos exigidos por el cliente.

Existen básicamente tres tipos de documentos aplicables a los ensayos no destructivos:

- ☞ **Normas.**
- ☞ **Procedimientos.**
- ☞ **Instrucciones de ensayo.**
- ☞ **Informes.**

a) **Normas**

Las Normas son documentos emitidos por una autoridad acreditada para ello, en los que se detallan todos los pasos que hay que seguir para ejecutar ensayos por líquidos penetrantes en las diferentes técnicas que se pueden emplear, incluyendo los márgenes admitidos para

los valores de los parámetros considerados (tiempo, temperatura, iluminación, etc.) y los criterios de aceptación y rechazo para cada una de las posibles situaciones que pueden presentarse en la realización de los ensayos. No es necesario que una Norma defina tanto los pasos de la ejecución como los criterios de aceptación y de hecho, estos dos aspectos del ensayo suelen estar definidos en Normas diferentes.

Las Normas españolas están emitidas por AENOR, ente acreditado por ENAC bajo la supervisión del Ministerio de Industria. Desde la incorporación de España a la Unión Europea, las Normas españolas UNE son la versión española de las Normas europeas EN, aplicables para todos los países de la UE, por lo que las antiguas Normas DIN, BS, AFNOR, UNÍ, etc. se están reeditando, después de ser revisadas, como EN-DIN, EN-BS, EN-AFNOR, EN-UNI. Igualmente, las **últimas** Normas se editan como EN-UNE.

Las Normas europeas se preparan y emiten mediante consenso de todos los países de la Unión Europea. Además de las Normas europeas, para este ensayo se utilizan Normas de diferentes países ajenos a la UE, como pueden ser ASTM de Estados Unidos, JIS de Japón. SIS de Suecia, etc.

#### **b) Procedimientos**

Los procedimientos son documentos emitidos por las empresas en los que, basándose en las Normas aplicables para cada caso, se detallan todos los pasos que la empresa ha de seguir para realizar ensayos por líquidos penetrantes. Son de obligado cumplimiento en la empresa.

Los procedimientos son mucho más concretos que las Normas. Un procedimiento puede estar basado en más de una Norma. En ellos, la empresa hace referencia a sus propios equipos y personal y a las técnicas que usa. La empresa puede modificar los procedimientos cuando así lo considere conveniente, siempre que la modificación no vaya en contra de las Normas en las que se basa.

#### **c) Instrucciones de ensayo**

La norma UNE EN 473 sobre "Cualificación y certificación de personal que realiza ensayos no destructivos. Principios generales", establece entre otros criterios que: ... el personal certificado como nivel 1 estará calificado para llevar a cabo las operaciones de ensayo no destructivo de acuerdo con instrucciones escritas y bajo la supervisión de un



nivel 2, o un nivel 3. ... el nivel 2 estará cualificado para preparar instrucciones de ensayo por escrito.

Las instrucciones de ensayo (también se pueden llamar "Pauta de control") es el documento que se entrega al operador para que realice el ensayo de una pieza determinada. En estas instrucciones se indican por lo tanto los requisitos de las Normas y del procedimiento de ensayo que son aplicables a una pieza en particular. (Ver anexo 2, ejemplo de un seguimiento de instrucción).

#### **d) Informes**

El informe de ensayo es el documento con el que la empresa evidencia que ha realizado un ensayo por líquidos penetrantes. Normalmente se presenta como un impreso en el que se rellenan sus casillas. El informe debe de hacer referencia a la empresa que lo emite, al cliente para quien va destinado el producto ensayado, al contrato de fabricación de ese producto, a los parámetros del ensayo y a los resultados obtenidos, con fecha y firma de quien lo ha realizado y de la autoridad que los visa. Puede incluir un croquis de la situación de las indicaciones observadas.

### **3.10.1 Preparación de la pieza de trabajo, tratamiento, identificación y protección de las áreas que no serán inspeccionadas.**

Para su ensayo la pieza debe ser perfectamente identificada. Luego se procederá a su limpieza protegiendo antes las áreas que no serán ensayadas. Se recuerda se deberá ensayar la pieza por lo menos una pulgada hacia las adyacencias de la zona de interés. Se deberá tener especial cuidado de no cubrir con penetrante áreas sin importancia para lo que la aplicación con pincel es recomendable.

Se deberá medir o estimar la temperatura de la pieza para efectuar el ensayo dentro de las temperaturas normalizadas.

Una vez limpia la superficie asegurarse de su buen secado.

#### **3.10.1.1 Limpieza preliminar a la inspección**

La preparación superficial, o mejor el acondicionamiento superficial, es una de las fases críticas del proceso de examen por cuanto si esta no es idónea, las discontinuidades pueden quedar obturadas con suciedad y el penetrante no poder penetrar. El factor de mayor

importancia en la elección del método de limpieza es el tipo de contaminante que deberá ser removido y el tipo de material a ser ensayado. Otros factores son el tamaño de la pieza, su historia termomecánica, su dureza, el tipo de aleación, terminación superficial de la pieza. Varias técnicas aplicables:

**a) Solventes.**

Aplicables para la limpieza de contaminantes orgánicos como aceites y grasas y no recomendados para suciedad inorgánica. Estos no deberán dejar residuos como por ejemplo la acetona pero su desventaja es su gran volatilidad que la hace peligrosa para el operador especialmente en ambientes poco ventilados.

El tricloroetileno debe ser empleado solamente para la limpieza inicial pues puede contaminar al penetrante. Se deberá tener claras las restricciones que dan las Normas o Códigos en cuanto a los contenidos de alógenos y azufre.

**b) Vapor desengrasante**

Es uno de los métodos más ampliamente usados y más efectivo para la remoción de contaminantes tipo orgánico.

Comúnmente se utiliza tricloroetileno.

Dado el corto tiempo de contacto del vapor es posible que la suciedad en discontinuidades profundas no sea extraída por lo que se recomienda una limpieza final con otro solvente.

**c) Soluciones de detergentes**

Son especialmente aplicadas cuando los contaminantes son de tipo inorgánico. Son soluciones en base agua que contienen surfactantes para el mojado, emulsificación y saponificación de varios tipos de suciedad orgánica como aceites y fluidos de maquinado, corte, etc.

Pueden ser ácidos, neutros o alcalinos y deben ser no corrosivos. El tiempo de limpieza está entre 10 a 15 minutos a una temperatura entre 70 a 90°C.

Las concentraciones deberán ser las recomendadas por el fabricante.

**d) Soluciones que tienen una acción química (decapantes ácidos y alcalinos, etc.)**

Aplicadas generalmente cuando se quieren eliminar óxidos presentes, decapar luego de una limpieza mecánica, etc. El producto a usar depende de las características del material y la contaminación.

Se debe poner especial atención en el lavado final para no dejar residuos ácidos (especialmente ácido crómico) que reducen la fluorescencia del penetrante. Sin embargo la limpieza química puede ser de gran ayuda cuando se requiere inspeccionar superficies anodizadas, plaqueadas o con recubrimientos (pinturas, barnices, etc.).

Los limpiadores alcalinos son soluciones acuosas no inflamables que contienen detergentes seleccionados para varios tipos de suciedades. Pueden usarse en forma caliente para remover óxidos o herrumbre. Las piezas deberán ser enjuagadas y secada perfectamente luego del proceso.

**e) Limpieza ultrasónica.**

Es el mejor método para remover suciedad de las discontinuidades pero puede ser una inversión en equipamiento muy alto.

**f) Modos mecánicos (amolado, arenado, cepillado, etc.)**

Estos métodos deberán ser aplicados con sumo cuidado puesto que se corre el riesgo de tapar discontinuidades por deformación de la superficie (materiales blandos) como también la obturación con partículas abrasivas.

En general estos métodos deberían ser seguidos con un ataque químico para corroer la sutil pátina metálica formada sobre la apertura de las discontinuidades.

**g) Removedores de pinturas**

Son removedores de pinturas comerciales que pueden ser tipo solvente de o tipos alcalinos para utilizar en caliente (80° a 90 °C) por inmersión. La pieza debe ser enjuagada y secada perfectamente luego de la remoción.

**h) Quemado con aire**

Aplicado generalmente a cerámicos. Se calienta la pieza en una atmósfera oxidante a alta temperatura (dependiendo de las propiedades de la pieza). Es una forma efectiva para remover suciedad orgánica.

**3.10.1.2 Condiciones y requerimientos para efectuar el secado.**

Luego de la limpieza preliminar la pieza deberá secarse perfectamente. Esto puede llevarse a cabo a través de la evaporación natural, recirculación de aire frío o caliente (secadores) manuales, lámparas, o estufas.

La temperatura y tiempo mínimo de secado deberá determinarse experimentalmente según los productos y materiales en uso, teniendo en cuenta que la pieza deberá estar a una temperatura entre 16° a 52° C (ASME V T652).

### **3.10.2 Aplicación del agente penetrante.**

La aplicación del penetrante puede realizarse por inmersión, con pincel o por spray. Si para este último caso se usan equipos de aire comprimido se deben colocar filtros en la entrada de aire para evitar contaminar al penetrante con aceites, partículas de polvo, agua, etc. o sedimentos que pueden estar presentes en el circuito.

El tiempo de penetración es crítico y depende de la temperatura de ensayo, tipo de discontinuidad y materiales, por lo que el mínimo será el recomendado en las normas o el que determine el procedimiento calificado

La temperatura es la anteriormente especificada (16° a 52°C)

#### **3.10.2.1 Tiempos de penetración:**

Tiempos aproximados de penetración para penetrantes coloreados (Ver anexo 3)

#### **3.10.2.2 Remoción del exceso del agente penetrante.**

Luego de que el tiempo de penetración ha transcurrido, se procederá a la remoción del excedente superficial cuidando de no remover aquel que está retenido en las discontinuidades.

El resultado de esta etapa debe ser evaluado bajo luz blanca para penetrantes coloreados y bajo luz negra para fluorescentes. La remoción dependerá del tipo de penetrante utilizado.

**a) Penetrantes lavables con agua:** En los procesos de líquidos penetrantes eliminables con agua se puede emplear agua normal de la red, si bien en algunos materiales (aceros inoxidable austeníticos, aleaciones base níquel, titanio o cobalto) se exige que el contenido de halógenos (cloro) esté por debajo de unos límites especificados. Dado que el LP contiene dentro de su formulación el emulsificador, puede ser removido directamente con agua. Esto se realiza con dispositivos (boquillas) que permitan aplicar una vasta lluvia o rociado de agua que no exceda una presión de 2 Kg /cm<sup>2</sup> (200 kPa) y a una temperatura entre 10 a 40 °C y no mayor a 43 °C (110°F).

El lavado deberá realizarse de tal forma que el chorro de agua no sea perpendicular a la superficie sino con un cierto ángulo. (Fig. 3-9)

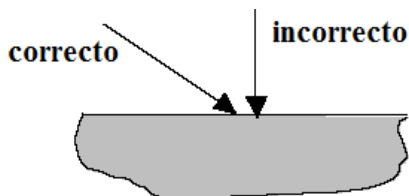


Fig. 3-9: Esquema donde se aprecia la correcta e incorrecta remoción del agente penetrante.

Se tendrá especial cuidado de no producir un sobre lavado realizando este paso bajo luz blanca con penetrantes coloreados y bajo luz negra para fluorescentes. Otra indicación importante es que el lavado para LP fluorescentes deberá hacerse de abajo hacia arriba para evitar el velo fluorescente que se produce sobre la pieza por el chorreado. En piezas fundidas donde la fluorescencia puede ser muy tenaz es posible la inmersión de la pieza y un rociado posterior siempre y cuando se tenga un buen control para evitar el sobrelavado.

b) **Penetrantes postemulsificables lipofílicos:** se componen de agentes emulsionantes dispersos o disueltos en aceite. Los penetrantes de esta categoría *no poseen el emulsificador* incorporado (El emulsionante lipofílico se mezclara con el aceite penetrante) por lo que se requerirá una etapa adicional de emulsificación sobre el LP en exceso. Por el movimiento de sus moléculas en un proceso de difusión, que se incrementa si aumenta la temperatura y la concentración, el penetrante quedara cubierto por una capa de emulsionante. El tiempo de contacto es crítico en este tipo de emulsionante (ver fig. 3-8)

<b>1 Aplicación de penetrante</b>	<b>2 Aplicación emulsionante</b>	<b>3 Comienza difusión</b>
<b>4 Termina la difusión</b>	<b>5 Lavado con agua</b>	<b>6 Superficie limpia</b>

Fig. 3-8 NDT Handbook. Vol 2, Ensayo de Líquidos penetrantes ASNT-ASM.

Esta etapa puede ser efectuada por:

- a) Inmersión: sumergiendo la pieza en el recipiente que contenga el emulsificador solo un tiempo suficiente para cubrir la pieza (toda la superficie en un mismo tiempo) y continuando el tiempo de emulsificación fuera de él. Para piezas pequeñas lo más conveniente es utilizar canastas para la inmersión.
- b) Rociado: del emulsificador sobre la pieza.

Para piezas grandes se debe cubrir toda la superficie lo más rápido posible. El tiempo de contacto es fundamental pues el determina la profundidad de emulsificación. Si es demasiado breve será difícil la remoción del exceso, si fuera muy largo se podrían perder por lavado el LP dentro de discontinuidades poco profundas. Este tiempo debe ser determinado experimentalmente y puede variar entre 30 segundos a 3 minutos aproximadamente (no excediendo de 5 min.) y está directamente relacionado con la concentración del emulsificador. La temperatura del emulsificador no es extremadamente crítica pero se recomienda que este entre 20° a 30°C (70° a 90 °F)

Una vez que esta técnica es ajustada en función del tipo de producto, material, tipo de discontinuidad, etc., es una de las más sensibles especialmente en aplicaciones automáticas de componentes en serie.

Remoción: Esta etapa es quizás la más importante para obtener reproducibilidad y el tiempo debería ser determinado experimentalmente (aproximadamente entre 10 seg. a 2 min.).

Se recomienda realizar la remoción con una lluvia abundante de agua a presión de 2 Kg/cm<sup>2</sup> (200 kPa) y a una temperatura de 10° a 40°C (50° a 100° C).

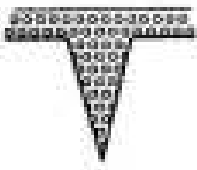
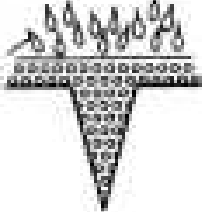


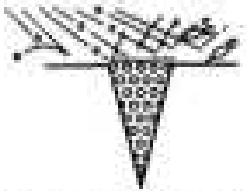

### **c) Penetrantes postemulsificables hidrofílicos:**

Al contrario que el emulsionante lipofílico, el hidrofílico no se disuelve en el penetrante, no hay difusión, y su acción consiste en disminuir la tensión superficial de la capa de penetrante con la que está en contacto, actuando sobre una pequeña cantidad de penetrante y evitando que se vuelva a juntar con el resto de penetrante.

El exceso de penetrante, disperso en la solución acuosa, se elimina de la superficie de la pieza por lavado con agua, principalmente por desplazamiento mecánico.

La remoción se realiza con la aplicación del emulsificador por contacto interfacial actuando por arrastre. Aquí el tiempo de emulsificación es menos crítico que en el caso de los

lipofílicos. Se recuerda que antes de su aplicación se debe dar un enjuague con abundante agua ( 30 a 90 seg. como mínimo) para ayudar al emulsificador y reducir así su rápida contaminación (ver figura 3-9). La temperatura del agua debe estar entre 10 a 40° C (50° a 100° F).

		
<b>1Aplicación de penetrante</b>	<b>2Aplicación de emulsionante</b>	<b>3Comienza acción emulsiva</b>
		
<b>4Termina acción emulsiva</b>	<b>5Lavado con agua</b>	<b>6Superficie limpia</b>

**Fig.3-9 Handbook, Vol 2 Ensayo de líquidos penetrantes ASNT-ASM.**

### **3.10.2.2.1 Proceso penetrantes eliminados con disolvente**

En este proceso, los disolventes o eliminadores suelen ser productos especiales con formulaciones particulares de cada fabricante. Se pueden dividir en dos grupos:

- Inflamables.
- No inflamables.

Los que más se utilizan son los orgánicos no inflamables que son hidrocarburos halogenados (por ejemplo, cloruro de metileno), pero presentan el inconveniente de su mayor toxicidad. Los inflamables, no tóxicos, son hidrocarburos o mezclas de hidrocarburos exentos de halógenos (alcohol isopropilico, nafta...).

### **3.10.2.3 Aplicación del revelador**

Depende del tipo de revelador usado. Deberá ser aplicado tan pronto como sea posible luego de la remoción del penetrante y el secado de la pieza:

**1) Revelador seco:** se aplica después de que la pieza ha sido secada. Se puede aplicar de las siguientes formas:

- Espolvoreando y eliminando el exceso con una corriente de aire seco muy suave.
- Por inmersión de la pieza dentro del polvo (algunas veces permisibles) y sacudiendo suavemente o con aire seco para eliminar el exceso de revelador.
- Con brochas muy suaves.
- Usando sopletes electrostáticos.

Se recuerda que este tipo de revelador debe ser usado con penetrantes fluorescentes ya que no da un fondo de contraste adecuado para los penetrantes coloreados. Idealmente este revelador debería ser liviano y veloso (no formar grumos) para permitir una fácil aplicación y debiéndose adherir en forma muy tenue a la superficie seca. Estos reveladores no deberían ser higroscópicos y permanecer bien secos, por lo que se deberá tener cuidado en su almacenaje y manejo. Los reveladores secos pueden formar grumos desde 3 micrones y más, hasta 100 micrones. Esto puede dificultar la remoción del penetrante en por ejemplo fisuras muy finas de pocos micrones de profundidad y ancho de boca de las que es necesario extraer todo el penetrante para visualizarlas.

Por razones de seguridad en la salud, los reveladores secos deberán ser manejados con cuidado. Como otras partículas de polvos, estas pueden reseca la piel y producir irritaciones respiratorias. Si el operador trabaja continuamente en la estación de revelado, es recomendable usar guantes de goma y máscaras.

**2) Revelador soluble en agua:** aplicados después de la remoción y antes del secado

- Se aplica por inmersión

Puede ser usado para líquidos fluorescentes y coloreados.

Estos reveladores no son recomendados para usar con penetrantes lavables con agua, debido al potencial lavado del penetrante retenido en las discontinuidades por el revelador. Su suministro es en la forma de polvos secos para ser disueltos en agua de acuerdo a las recomendaciones del fabricante. En general desde 0.12 a 0.24 Kg/litro.



La concentración de los baños debe ser controlada periódicamente con un densímetro. Dentro de su composición tienen inhibidores de corrosión y bactericidas. Las ventajas de este tipo de revelador son las siguientes:

- a) Como el polvo es soluble en agua, no se requiere la agitación continua del baño.
- b) El revelador se aplica antes del secado disminuyendo así el tiempo de revelado.
- c) Como la película formada después del secado es completamente soluble en agua, es fácilmente removible con un enjuague.

**3) Revelador en suspensión acuosa:** aplicados después de la remoción y antes del secado.

Se aplican por:

- Inmersión
- Vertido.
- Spray.

Pueden ser usados con LP fluorescentes o coloreados.

Se suministran como polvos secos para luego agregarles agua y formar la suspensión. En general las proporciones pueden ser entre 0,04 a 0,12 Kg/litro y se debe tener sumo cuidado de mantener el polvo en suspensión dado que demasiado o muy poco revelador sobre la superficie de la pieza puede afectar la sensibilidad del ensayo. También en este caso se controla rutinariamente con un densímetro la concentración.

Su formulación contiene agentes dispersantes que ayudan a mantener las partículas en suspensión. Así también contienen inhibidores de corrosión, biocidas y agentes humectantes tanto para un buen cubrimiento de la superficie de las piezas como para su limpieza final.

**4) Reveladores suspendidos en solventes:** se aplican siempre después del secado ya sea por:

- Aerosol.
- Spray electrostático.

Se usan tanto para LP fluorescentes como para coloreados.

Este tipo de revelador produce una capa muy blanca sobre la superficie dando un máximo de contraste para ambos tipos de LP.

Dentro de su formulación contienen solventes compatibles con los penetrantes y agentes surfactantes en un dispersante que cubren las partículas y así evitar su tendencia a la aglomeración.

Los reveladores en suspensión no acuosa son los más sensibles para el revelado de LP fluorescentes puesto que la acción del solvente contribuye a los mecanismos de absorción y adsorción. En muchos casos en donde hay discontinuidades muy estrechas, los reveladores acuosos (ambos tipos) no llegan a contactar el LP entrampado por lo que la acción capilar no se produce.

Los reveladores no acuosos entran al defecto y se disuelven en el penetrante aumentando su volumen y reduciendo su viscosidad.

Dentro de su composición hay dos tipos de solventes:

a) No inflamables: solventes clorados.

b) Inflamables: solventes no clorados.

Ambos son ampliamente usados y su selección depende principalmente del tipo de material que se vaya a inspeccionar.

### **3.11 Ensayo de acuerdo con instrucciones escritas.**

Las instrucciones escritas deben contener los detalles que el operador necesita conocer para realizar el ensayo con líquidos penetrantes, como pueden ser los siguientes:

1. Condiciones de preparación superficial de la pieza
  - ☞ Eliminación de la protección anticorrosión, si hay.
  - ☞ Limpieza superficial: tipo de producto a emplear, condiciones de utilización.
  - ☞ Ataque químico, si la pieza ha pasado un proceso mecánico (chorreado).
2. Productos penetrantes a utilizar
  - ☞ Penetrante: tipo, fabricante, condiciones de uso.
  - ☞ Emulsionante: tipo, fabricante, condiciones de uso.
  - ☞ Revelador: tipo, fabricante, condiciones de uso.
3. Condiciones de aplicación del penetrante
  - ☞ Aplicación en inmersión, pulverización...

- ☞ Tiempo de penetración.
- ☞ Recomendaciones particulares (temperatura, etc.).
- 4. Condiciones de eliminación del exceso del penetrante
  - ☞ Lavado con agua, empleo de emulsionante, eliminación con disolvente.
  - ☞ Tiempo de emulsionado, si se emplea.
- 5. Comprobación eliminación del exceso
  - ☞ Inspección con luz blanca, o luz negra.
- 6. Condiciones de secado de las piezas
  - ☞ Secado al aire ambiente, aire a presión, en horno.
  - ☞ Tiempo de secado.
  - ☞ Temperatura de secado máxima.
- 7. Condiciones de aplicación del revelador
  - ☞ Aplicación por pulverización, lecho fluido...
  - ☞ Tiempo de revelado.
- 8. Condiciones de observación de indicaciones
  - ☞ Inspección a simple vista, con lupa (x aumentos).
  - ☞ Tipo de iluminación: luz blanca, luz negra, nivel de intensidad de iluminación.
- 9. Criterios de aceptación de indicaciones
  - ☞ Longitud mínima a registrar.
  - ☞ Número de indicaciones aisladas por unidad de superficie.
  - ☞ Número de indicaciones agrupadas por unidad de superficie.

## **3.12 Registro de indicaciones.**

### **3.12.1 Informes escritos**

Las Normas sobre ensayo no destructivo indican que el resultado obtenido en el ensayo de Líquidos penetrantes, así como toda la información relacionada, se tiene que presentar en el documento que se conoce como “Informe del ensayo”(tabla 3-6). El informe del ensayo debe contener la información siguiente:

- a) Empresas que intervienen:
  - ☞ Nombre de la entidad que realiza el ensayo.

- ☞ Nombre del cliente, dirección.
- b) Datos de identificación del trabajo:
  - ☞ N° informe, Fecha, referencia del trabajo, N° de pedido, plano.
- c) Información sobre la pieza ensayada:
  - ☞ Denominación, dimensiones.
  - ☞ Material (acero inoxidable, aluminio...), N° de colada...
  - ☞ Tratamiento térmico (temple, normalizado...).
  - ☞ Estado superficial (forjado, laminado, mecanizado...).
  - ☞ Extensión del ensayo: 100%, muestreo, por zonas (indicar).
- d) Condiciones del ensayo:
  - ☞ Familia de productos: por ejemplo, penetrante coloreado visible eliminable con disolvente y revelador húmedo no acuoso.
  - ☞ Referencia de los productos, N° de lote y fabricante de los mismos.
  - ☞ Limpieza previa (con disolvente, vapor...).
  - ☞ Temperatura de ensayo, temperatura de secado.
  - ☞ Modo de iluminación: luz blanca y nivel (lux), luz negra y nivel ( $W/m^2$ )
- e) Resultados de ensayo:
  - ☞ Puede resultar práctico presentarlos en forma de tabla, numerando las indicaciones, tipo de indicación (lineal, redondeada, agrupadas....), situarlas con referencia a un origen y dimensionarlas (longitud, anchura)...
- f) Croquis:

Se incluye la siguiente información:

  - ☞ Croquis de la pieza.
  - ☞ Zona ensayada.
  - ☞ Situación de indicaciones.
  - ☞ Observaciones.
- g) Normas (de ensayo, aceptación/rechazo), procedimiento de ensayo de la empresa.
- h) Lugar de ensayo, fecha de ensayo, nombre del operador y nivel.
- i) Supervisor del ensayo y nivel, fecha y firma.
- j) Sí se ha acordado con el cliente, inspector del cliente, fecha y firma.

**3.12.2 Formulario de ensayo.**

El siguiente es un ejemplo de los datos necesarios en un formulario de ensayo.

(Nombre de la empresa)														
<b>INFORME DE ENSAYO POR LIQUIDOS PENETRANTES</b>														
Cliente:						Informe N°:            Pág.N°: __ de __			Fecha:					
						Referencia de trabajo:								
						Pedido:								
Dirección:						Plano:								
<b>CONDICIONES DEL ENSAYO</b>						<b>PIEZA(S) A ENSAYAR</b>								
Limpieza previa:						Denominación:								
Familia de penetrantes:														
Marca de productos:						Dimensiones:								
Ref. penetrante:			T. penetración:			Material:			Colada N°:					
Lote:														
Ref. emuls/elim.:			T. secado:			T. térmico								
Ref. revelador:			T. revelado											
Lote:														
Temp. De ensayo: __°C		Temp. Secado: __°C				Estado superficial			Extensión del ensayo:					
Iluminación: <input type="checkbox"/> Luz blanca: __L <input type="checkbox"/> Luz negra: __W/m <sup>2</sup>														
<b>RESULTADO DEL ENSAYO. INDICACIONES OBSERVADAS</b>														
Indicación N°	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11			
Tipo indicación														
Distancia origen														



## **4.0 Análisis con partículas magnéticas**

---

La inspección por partículas magnéticas permite detectar discontinuidades superficiales y subsuperficiales en materiales ferromagnéticos. Se selecciona usualmente cuando se requiere una inspección más rápida que con los líquidos penetrantes.

El principio del método es la formación de distorsiones del campo magnético o de polos cuando se genera o se induce un campo magnético en un material ferromagnético; es decir, cuando la pieza presenta una zona en la que existen discontinuidades perpendiculares a las líneas del campo magnético, éste se deforma o produce polos. Las distorsiones o polos atraen a las partículas magnéticas, que fueron aplicadas en forma de polvo o suspensión en la superficie sujeta a inspección y que por acumulación producen las indicaciones donde exista distorsión en las líneas de flujo (fuga de campo) que se observan visualmente de manera directa o bajo luz ultravioleta.

Las partículas magnetizables pueden ser aplicadas sobre la superficie como partículas secas o como una suspensión en un líquido como agua y kerosén.

Los materiales ferromagnéticos incluyen a la mayoría de las aleaciones de hierro, cobalto, níquel. Muchos aceros endurecidos por precipitación como por ejemplo los aceros inoxidables 17-4 PH, 17-7 PH, 15-4 PH, son magnéticos después del envejecimiento.

### **4.1 Ventajas y limitaciones del método**

La aplicación de este método es prácticamente exclusiva para materiales ferromagnéticos, esto excluye a materiales no ferromagnéticos tales como: aluminio, magnesio, cobre, plomo, titanio y aleaciones de acero inoxidables austeníticos.

Las partículas magnéticas se utilizan a menudo para buscar agrietamiento en las juntas soldadas y en las zonas identificadas como sensibles a la ruptura en el medio ambiente (por ejemplo, el estrés o la aparición de fisuras por corrosión inducida, la fatiga de grietas o deformaciones de agrietamiento en tuberías, piezas de maquinarias, equipos, etc.)

**Ventajas:**

- ☞ Es un método especialmente sensible para la localización de fisuras superficiales pequeñas y angostas en materiales ferromagnéticos.
- ☞ Las partículas magnéticas, permiten encontrar discontinuidades que aun no han llegado hasta la superficie del material examinado (discontinuidades subsuperficiales), hasta una cierta profundidad.
- ☞ Es de uso aplicable en un gran número de tamaños y formas de las piezas a ser inspeccionadas.
- ☞ Normalmente no se requiere de una limpieza complicada inicial, ya que las fisuras rellenas de material extraño pueden ser igualmente detectadas.

**Limitaciones:**

- ☞ El método solo puede ser usado para inspeccionar piezas de material ferromagnético.
- ☞ Este método detecta daños superficiales y subsuperficiales cuyas profundidades oscilan entre los 3 a 2mm.
- ☞ Se debe considerar el espesor de capas de pinturas u otros recubrimientos no magnéticos, que puedan afectar adversamente la inspección.
- ☞ Se debe magnetizar secuencialmente en diferentes direcciones debido a que las discontinuidades debe estar perpendicular al campo magnético para poder ser detectadas.
- ☞ Se requiere (en la mayoría de veces) desmagnetizar las piezas luego del ensayo.
- ☞ Para piezas grandes se requiere de una excesiva intensidad de corriente.
- ☞ Se debe tener cuidado de no producir recalentamientos localizados en los puntos de contacto sobre piezas terminadas.
- ☞ Aunque las indicaciones de las partículas son vistas fácilmente, se debe tener la capacidad y experiencia necesaria para poder sacar conclusiones y dar las recomendaciones respectivas.



## **4.2 Conceptualización básica para la inspección por partículas magnéticas.**

La inspección por partículas magnéticas (MPI) es una técnica no destructiva relativamente sencilla, basada en la propiedad de ciertos materiales de convertirse en un imán.

### **4.2.1 Magnetismo**

El físico danés Hans Christian Oersted evidenció en 1820 por primera vez que una corriente genera un campo magnético alrededor del conductor, la dirección de las líneas de flujo magnético es siempre a 90° con respecto a la dirección del flujo de la corriente eléctrica.

Cuando un conductor tiene una forma uniforme, la densidad de flujo o número de líneas de fuerza por unidad de área es uniforme a lo largo de la longitud del conductor y decrece uniformemente al incrementar la distancia desde el conductor. En el interior de la materia existen pequeñas corrientes cerradas al movimiento de los electrones que contienen los átomos, cada una de ellas origina un microscópico imán. Cuando estos pequeños imanes están orientados en todas direcciones sus efectos se anulan mutuamente, el material no presenta propiedades magnéticas; y en cambio, si todos los imanes se alinean actúan como un único imán y en ese caso decimos que la sustancia se ha magnetizado.

**Ampere** demostró que El efecto magnético de la corriente en un alambre se puede intensificar enrollándolo en forma de una bobina la intensidad del flujo magnético es proporcional al número de vueltas.

### **4.2.2 Polos magnéticos**

Tanto si se trata de un tipo de imán como de otro la máxima fuerza de atracción se halla en sus extremos, llamados *polos*. Un imán consta de dos polos, denominados *polo norte* y *polo sur*. Polos iguales se repelen y polos distintos se atraen. No existen polos aislados (monopolo magnético), y por lo tanto, si un imán se rompe en dos partes, se forman dos nuevos imanes, cada uno con su polo norte y su polo sur, aunque la fuerza de atracción del imán disminuye.

Entre ambos polos se crean líneas de fuerza, siendo estas líneas cerradas, por lo que en el interior del imán también van de un polo al otro. Como se muestra en la figura 4-1, pueden ser visualizadas esparciendo limaduras de hierro sobre una cartulina situada encima de una barra imantada; golpeando suavemente la cartulina, las limaduras se orientan en la dirección de las líneas de fuerza.

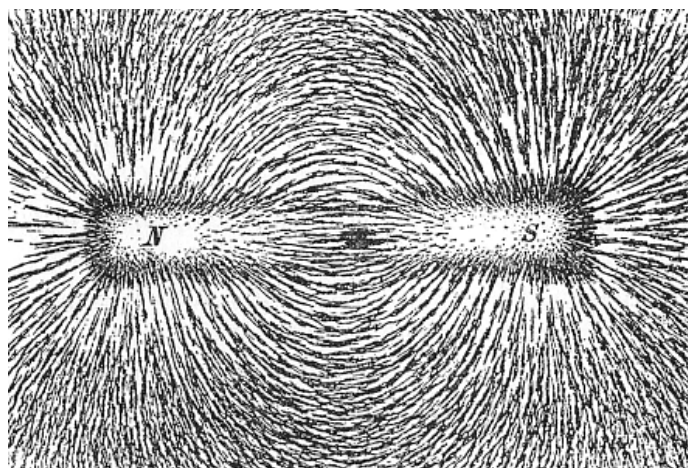


Fig. 4-1: Patrón de comportamiento del campo magnético de un imán, visible gracias a las limaduras de hierro.

Un campo magnético tiene dos fuentes que lo originan. Una de ellas es una corriente eléctrica de convección, que da lugar a un campo magnético estático. Por otro lado una corriente de desplazamiento origina un campo magnético variante en el tiempo, incluso aunque aquella sea estacionaria.

### **4.2.3 Tipos de materiales magnéticos**

Una sustancia que puede ser magnetizada en un campo magnético es llamada material magnético.

Todas las sustancias son más o menos materiales magnéticos. Muchas sustancias son magnetizadas de acuerdo a la intensidad de la fuerza magnética solamente cuando ellas están en un campo magnético.

Los materiales magnéticos<sup>2</sup> están divididos en las dos clases siguientes:

---

<sup>2</sup> La propiedad física en la que se basa esta clasificación es la Permeabilidad la cual consiste en la Propiedad de algunos materiales de poder ser magnetizados. Más específicamente es la relación entre la densidad de flujo y la fuerza del campo magnetizante (B/H).

**Materiales paramagnéticos:** los cuales son magnetizados en la misma dirección que la fuerza magnética externa y tienen permeabilidades un poco mayor que en el vacío; son levemente atraídos por un campo magnético, pero no se magnetizan.

**Materiales diamagnéticos,** los cuales son magnetizados en la dirección contraria a la fuerza magnética externa y tienen permeabilidades un poco menores que en el vacío; Son levemente repelidos por un campo magnético, se magnetizan pobremente.

Las sustancias las cuales son fácilmente magnetizadas son llamados **materiales ferromagnéticos** (están dentro de los paramagnéticos).

Los materiales ferromagnéticos, Son fácilmente atraídos por un campo magnético, se magnetizan fácilmente .ejemplo de estos son el hierro, aceros, níquel y cobalto, son también paramagnéticos pero tienen una propiedad adicional. Un trozo común de un material ferromagnético contiene pequeñas unidades magnéticas señalando en todas direcciones. Si el material ferromagnético es magnetizado, todas las pequeñas unidades señalarán en la dirección del campo aplicado. Las pequeñas unidades magnéticas no son átomos o electrones, sino un grupo especial de átomos llamados **dominios magnéticos**. Por ejemplo en un material tal como el hierro, los átomos se unen en “clusters” (dominios) .En estos grupos todos los pequeños imanes atómicos apuntan en la misma dirección. Los dominios son generalmente de pocas centésimas de milímetros, y cada dominio actúa como si fuera un pequeño imán.

Si una pieza de hierro o acero esta desmagnetizada, los dominios están orientados en todas direcciones y sus efectos se cancelan. Si el material es puesto en un fuerte campo magnético, dos cosas pueden suceder. Los dominios mejor ubicados crecen poco a poco a expensas de otros dominios que disminuyen su tamaño y luego giran alineándose con la dirección del campo.

Cuando un gran número de dominios han sido alineados en una dirección el total de la pieza de hierro o acero se convierte en un imán.

El calentamiento de un imán de acero hasta el rojo puede producir la pérdida de su magnetismo. La razón de esto es que algunos dominios salen de su posición de

alineamiento. La temperatura a la cual un material ferromagnético se vuelve no magnético es llamada temperatura de Curie. Las temperaturas de Curie del Fe, Co y Ni son aproximadamente 668 ° C, 1120 ° C y 353 ° C.

La tabla 4-1 muestra un resumen de las características de los materiales:

Diamagnéticos	Paramagnéticos	Ferromagnéticos
<ul style="list-style-type: none"> <li>•No son magnetizables.</li> <li>•No son atraídos por un campo magnético.</li> <li>•Son ligeramente repelidos por un campo magnético.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Materiales que son débilmente atraídos por un campo magnético y tienen una pequeña tendencia a la magnetización; estos no son inspeccionables por partículas magnéticas.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Son fácilmente magnetizables.</li> <li>•Son fuertemente atraídos por un campo magnético.</li> <li>•Son capaces de retener su magnetización después que la fuerza magnetizante ha sido removida.</li> </ul>
Mercurio. •Oro. •Bismuto. •Zinc. •Cobre •Plata. •Plomo.	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Aluminio, magnesio.</li> <li>•Molibdeno, litio.</li> <li>•Cromo, platino.</li> <li>•Sulfato de cobre.</li> <li>•Estaño, potasio.</li> <li>•Aceros inoxidable austeníticos y de la serie 300.</li> </ul>	Hierro, níquel, cobalto y gadolinio. <ul style="list-style-type: none"> <li>•Mayoría de los aceros, inclusive inoxidable de la serie 400 y 500.</li> <li>•Aleaciones de cobalto y níquel.</li> <li>•Aleaciones de cobre, manganeso y aluminio.</li> </ul>

Tabla 4-1: Características de los materiales.

## 4.2.4 Campo magnético debido a una corriente eléctrica.

### 4.2.4.1 Campo magnético en un conductor recto

La ley de Amper establece que la integral lineal de H en un camino cerrado es exactamente igual a la corriente continua encerrada en ese camino. Esta relación se da en la ecuación (1)

$$\int Hdl = I[A] \quad (1)$$

Se define una corriente positiva como aquella que fluye en la dirección de avance derecho de un saca corchos.

Aplicando la Ley alrededor de un camino circular a una distancia r del eje del conductor (Fig.4-2), y por simetría, H debe ser constante alrededor de este camino.

Ecuación (2)

$$\int Hdl = H \cdot 2\pi r l \quad (2)$$

$$\therefore H = \frac{I}{2\pi r} [A/m]$$

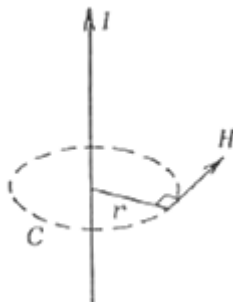


Fig. 4-2 Campo magnético alrededor de un alambre conductor recto y largo.

Esta es la única componente posible de H y corresponde a la intensidad total del campo magnético debido a la corriente. Así, el campo magnético se dispone en círculos alrededor del alambre conductor.

**4.2.4.2 Campo magnético en el interior de un conductor cilíndrico sólido transportando corriente distribuida uniformemente.**

Aplicando la Ley de Amper alrededor de un círculo a una distancia “r” del eje de la barra donde “r” es menor que “a” (radio del conductor) (Fig. 4-3). La corriente encerrada por el camino será:

Ecuación 3

$$I = \frac{\pi r^2}{\pi a^2} = I[A] \quad (3)$$

Así: 
$$\int H \cdot dl = H \cdot 2\pi r = \left(\frac{r^2}{a^2}\right) I$$

Y 
$$H = \left(\frac{r}{2\pi a^2}\right) I [A/m]$$

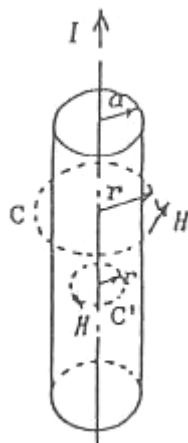


Fig. 4-3 Campo magnético alrededor de una barra recta y larga.

Combinando los resultados de la ecuación 2. y 3, la Fig. 4-4. Muestra un gráfico de H versus “r” en el interior y exterior del conductor.

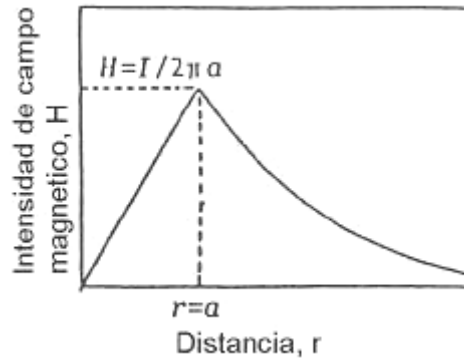


Fig. 4-4: gráfico H (intensidad de campo) vrs r (distancia)

#### 4.2.4.3 Campo magnético en el eje de un solenoide de sección transversal circular.

Sea la corriente “i” que fluye en un solenoide, la longitud del solenoide es “l” y el número de vueltas de la bobina es N. La intensidad del campo magnético en el punto O en la Fig. 4-5.

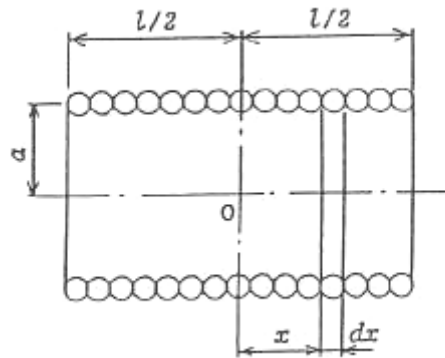


Fig. 4-6: Campo magnético en el eje del solenoide de una bobina de sección transversal circular.

Esta dado por la ecuación 4.

$$H_o \int_{-l/2}^{+l/2} \left\{ a^2 N / 2l (a^2 + x^2)^{3/2} l \right\} dx = Nl / 2 \left\{ a^2 + (l/2)^2 \right\}^{3/2} [A / m] \quad (4)$$

La intensidad de campo magnético en el punto P en la figura 4-6. Esta dado por la ecuación 5.

$$H_p = \int_{-(l/2+b)}^{l/2-b} \left\{ a^2 + Nl(a^2 + x^2) \right\}$$

$$H_p = \int_{-(l/2+b)}^{l/2-b} \left\{ a^2 + Nl/2(a^2 + x^2)^{3/2} l \right\} dx \quad (5)$$

$$= \left( \frac{NI}{2l} \right) \left[ \frac{(l/2-b)}{\{a^2 + (l/2-b)^2\}^{1/2}} + \frac{(l/2+b)}{\{a^2 + (l/2+n)^2\}^{1/2}} \right] [A/m]$$

La figura 4-7. Muestra la relación entre  $H_p/H_0$  y  $b/(l/2)$  para dos solenoides de  $l/2a= 5$  y  $l/2a= 0.4$ .

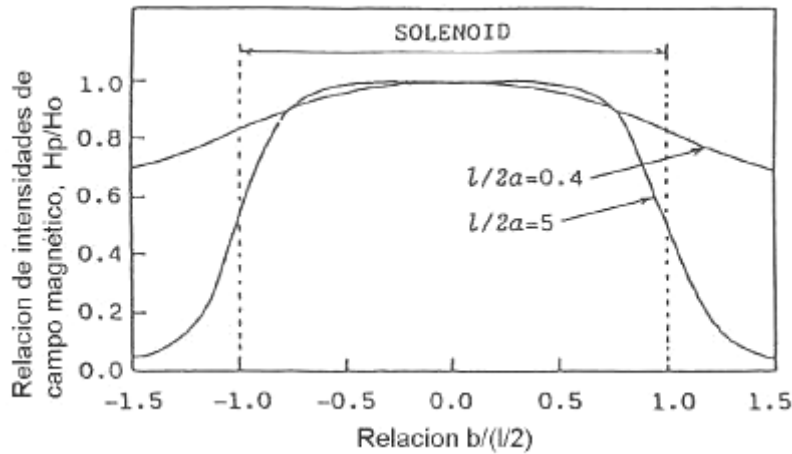


Fig. 4-7: Distribución de H en el eje del solenoide

#### 4.2.4.4 Campo magnético en el interior de un toroide.

Considere un anillo como el mostrado en la Fig. 4-8. Alrededor del cual se coloca una bobina cerrada uniformemente distribuida. A esto se le llama toroide.

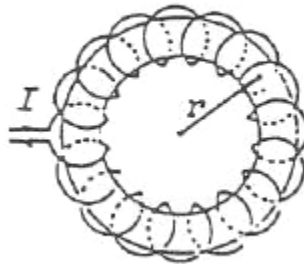


Fig. 4-8: Toroide

Aplicando la Ley de Amper alrededor de la línea central del anillo como se muestra en la figura 4-8.

$$H \cdot dl = H \cdot 2\pi r = ni \quad (6)$$

Donde “i” es la corriente que fluye en la bobina y n es el número de vueltas de la bobina. Así:

$$H = \frac{ni}{2\pi r} \quad (7)$$

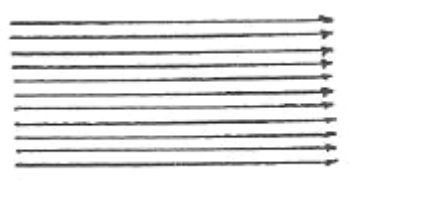
Donde la intensidad del campo magnético es inversamente proporcional al radio. Si el radio principal del anillo es grande comparado con la sección transversal, el campo en el toroide tenderá a ser uniforme.

#### **4.2.5 Distribución de las líneas de inducción magnéticas.**

Cuando un material ferromagnético es puesto en un campo magnético de intensidad uniforme  $H_0$ , generalmente la densidad de flujo no es uniforme en el material aún en el caso de utilizar corriente continua para la magnetización. Por ejemplo, cuando se coloca una barra como la de la figura 4-9 en un campo uniforme, la distribución de líneas de inducción magnéticas se distribuyen como se muestra en la Fig. 4-10 a no uniformemente.

La Fig. 4-10 b muestra la distribución en el caso de que la pieza sea cilíndrica. Como se observa, la mayoría de las líneas pasan a través del material ferromagnético siendo la intensidad de campo en su interior (huevo interior) considerablemente más pequeño que  $H_0$ . A este fenómeno se lo conoce como “escudo magnético”.

En el caso de la Fig. 4-10 c, tenemos una geometría elipsoidal en donde las líneas de inducción magnética se distribuyen de forma uniforme dentro del material.



**Fig. 4-9: Campo magnético uniforme.**



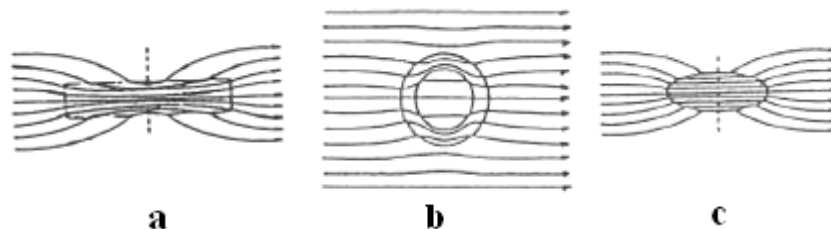


Fig. 4-10: Distribución de las líneas de inducción magnética

#### **4.2.6 Inspección por partículas magnéticas.**

Antes de iniciar la inspección por partículas magnéticas se debe contar con un conjunto de inspección de partículas magnéticas como el mostrado en la Fig 4-22, además es conveniente tomar en cuenta los siguientes datos:

1. La planificación de este tipo de inspecciones se inicia al conocer cuál es la condición de la superficie del material y el tipo de discontinuidad a detectar. Así mismo deben conocerse las características metalúrgicas y magnéticas del material a inspeccionar; ya que de esto dependerá el tipo de corriente, las partículas a emplear y, en caso necesario, el medio de eliminar el magnetismo residual que quede en la pieza.
2. Si se trabaja bajo normas internacionales (Código ASME, API, AWS) o de compañías (Bell, Pratt & Whitney o GE), las partículas a emplear deben ser de los proveedores de las listas de proveedores aprobados o confiables publicados por ellas. En caso necesario, se solicita al proveedor una lista de qué normas, códigos o especificaciones de compañías satisfacen sus productos.
3. Al igual que en el caso de los líquidos penetrantes, una vez seleccionado uno o varios proveedores, nunca se deben mezclar sus productos, como puede ser el caso de emplear las partículas del proveedor A con un agente humectante del proveedor B o las partículas de diferentes colores o granulometrías fabricadas por el mismo proveedor.

### **4.3 Tipos de discontinuidades (descripción de partículas magnéticas)**

Los tipos de discontinuidades que se pueden estudiar por este método se limita a dos:

- ☞ Superficiales
- ☞ Subsuperficiales (muy cercanas a la superficie)

En los cuales se pueden encontrar defectos tales como: Poros, grietas, rechupes, traslapes, costuras, laminaciones, etc.

Materiales:

Materiales ferromagnéticos (aceros, fundiciones, soldaduras, níquel, cobalto y sus aleaciones)

Aplicaciones:

Se utilizan para la detección de discontinuidades superficiales y subsuperficiales (hasta 1/4" de profundidad aproximadamente, para situaciones prácticas) en materiales ferromagnéticos.

Esta método se aplica a materiales ferromagnéticos, tales como:

- ☞ Piezas de fundición, forjadas, roladas.
- ☞ Cordones de soldadura.
- ☞ Inspección en servicio de algunas partes de avión, ferrocarril, recipientes sujetos a presión,
- ☞ Ganchos y engranes de grúa (ver Fig. 4-32), estructuras de plataforma, etc.

Es sensible para la detección de discontinuidades de tipo lineal, tales como;

- ☞ Grietas de fabricación o por fatiga Fig. 4-33.
- ☞ Desgarres en caliente.
- ☞ Traslapes.
- ☞ Costuras, faltas de fusión.
- ☞ Laminaciones, etc.

## 4.4 Secuencia de la inspección.

Es importante destacar que con este método sólo pueden detectarse las discontinuidades perpendiculares a las líneas de fuerza del campo magnético. De acuerdo al tipo de magnetización, los campos inducidos son longitudinales o circulares. Además, la magnetización se genera o se induce, dependiendo de si la corriente atraviesa la pieza inspeccionada, o si ésta es colocada dentro del campo generado por un conductor adyacente.

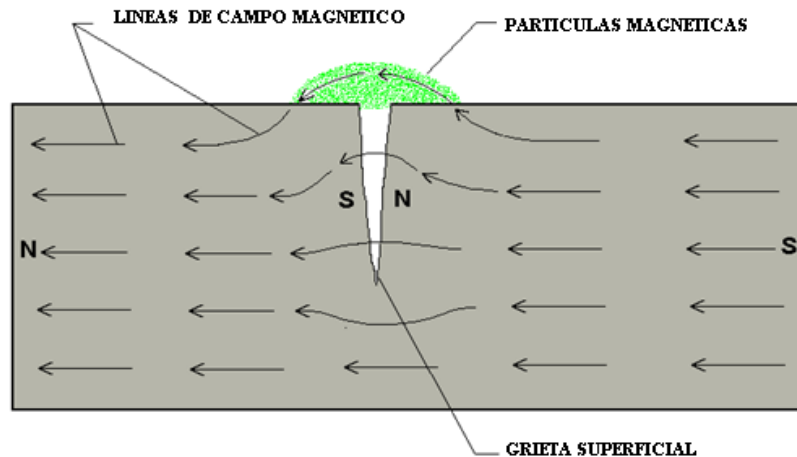


Fig. 4-11: Se muestra una pieza electromagnética con una grieta superficial.

### 4.4.1 Corriente de magnetización.

Es la forma o mecanismo mediante el cual se magnetizará.

Uno de los requerimientos básicos para la inspección por Partículas Magnetizables es que la pieza debe ser adecuadamente magnetizada de tal forma que el escape del campo creado por la discontinuidad, atrape las Partículas Magnetizables.

Los imanes permanentes (Fig. 4-24) son útiles para estos propósitos pero generalmente la magnetización se produce por electroimanes (Fig. 4-23) o con el flujo magnético asociado al flujo de una corriente eléctrica. Básicamente, la magnetización deriva del campo magnético circular generado cuando una corriente fluye por un conductor. La dirección del campo depende de la dirección con la que la corriente fluye, y puede ser determinada por la regla de la mano derecha.

#### **4.4.2 Técnicas de magnetización.**

Se seleccionará en función de la localización probable de las discontinuidades; si se desea detectar sólo discontinuidades superficiales, debe emplearse la corriente alterna, ya que ésta proporciona una mayor densidad de flujo en la superficie y por lo tanto mayor sensibilidad para la detección de discontinuidades superficiales; pero es ineficiente para la detección de discontinuidades subsuperficiales.

Si lo que se espera es encontrar defectos superficiales y subsuperficiales, es necesario emplear la corriente rectificada de media onda; ya que ésta presenta una mayor penetración de flujo en la pieza, permitiendo la detección de discontinuidades por debajo de la superficie. Sin embargo, es probable que se susciten dificultades para desmagnetizar las piezas.

##### **4.4.2.1 Inducción directa.**

Se consigue haciendo pasar una corriente eléctrica a través de la pieza. La pieza es montada horizontalmente, sujeta por dos cabezales por los que circula la corriente. Otro método directo de inducir un campo magnético circular es por el uso de puntas de contacto, su aplicación más común es en placas y soldaduras. En este caso se utiliza medio seco.

- **Directa.**

La corriente magnetizante fluye directamente a través de la pieza, creando un flujo magnético circular en ella.

Para piezas pequeñas que no tengan orificios interiores pasantes, el campo circular se produce por medio del contacto directo de la pieza (circulación de corriente a través de la pieza). Este se realiza colocando las piezas entre cabezales de contacto generalmente en equipos estacionarios Fig. 4-12. Un equipo similar se puede usar como suministro de corriente de magnetización en la técnica con conductor central.

Puntas de contacto, entre cabezales, pinzas o mordazas y electrodos imantados.

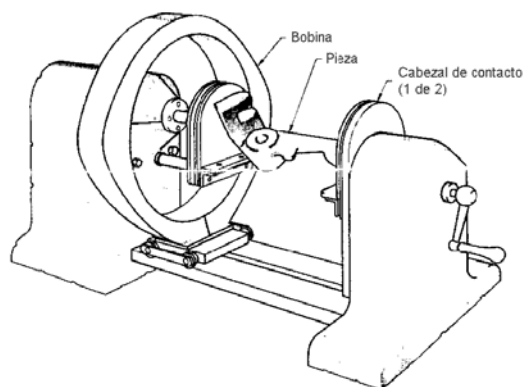


Fig. 4-12: Para otras aplicaciones o requerimientos, se dispone de bancos de diferentes dimensiones y amperajes y, para cada bancada, posee se ofrecen distintos accesorios (cabinas, extractores, dispensadores, cabezales rotatorios, etc.).

- **Puntas de contacto.**

En la inspección de piezas grandes y demasiado voluminosas como para colocar en un banco entre cabezales, la magnetización frecuentemente se realiza con puntas de contacto (Fig. 4-13). Las puntas pasan la corriente directamente por la pieza, a través de una zona localizada.

La técnica por puntas no siempre produce campos realmente circulares, pero ellos son muy adecuados para muchos propósitos prácticos.

Esta técnica se utiliza comúnmente en grandes fundiciones y soldaduras.

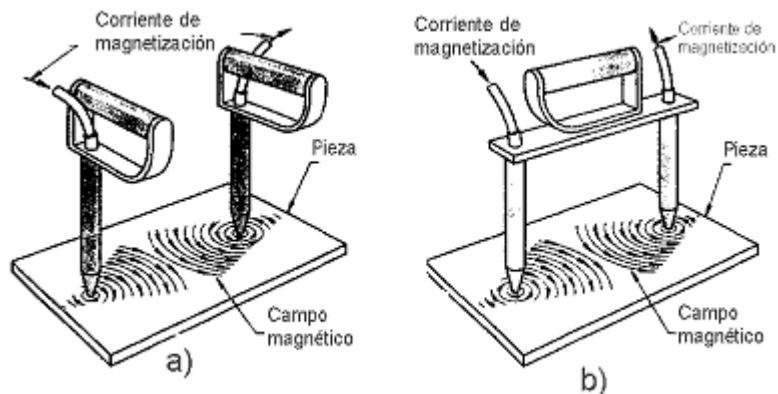


Fig. 4-13: Puntas de contacto simples(a) o dobles (b).

- **Pinzas o mordazas.**

La corriente magnetizante se aplica a la pieza a través de las pinzas o mordazas, produciéndose un flujo magnético circular en la pieza.

- **Entre cabezales**

La pieza es colocada como se muestra en la figura 4-14, entre dos cabezales y se aplica la corriente directamente a través de ella, esto produce un campo magnético circular aproximadamente perpendicular a la dirección del flujo de la corriente.

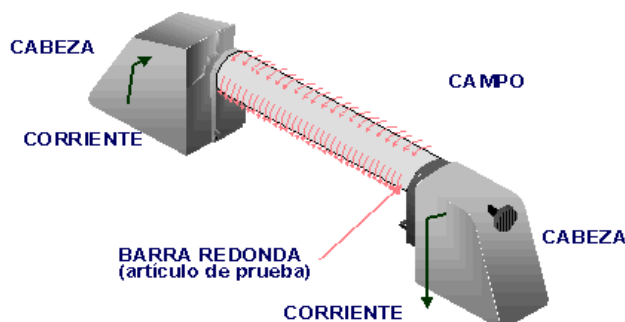


Fig. 4-14 Empleo de la técnica de cabezales para piezas cilíndricas.

- **Corrientes Inducidas.**

La utilización de corrientes inducidas para la magnetización circunferencial en piezas en forma de anillos es una técnica muy apropiada.

Esta se lleva a cabo orientando adecuadamente el anillo dentro de una bobina de magnetización de tal forma que vincule o encierre las líneas del flujo magnético (flujo disperso), como muestra la (Fig. 4-15 a). Cuando el flujo magnético (en la bobina) cambia (aumenta o disminuye) cortando a la pieza, en el anillo se produce una corriente inducida circular y con una dirección que se opone al cambio del flujo. La magnitud de esta corriente depende del flujo total, de su velocidad de cambio y de la impedancia asociada con el paso de corriente dentro del anillo. Incrementando el flujo en la bobina y su velocidad de cambio, se incrementa la intensidad de la corriente en el anillo produciendo un campo magnético toroidal que abarca toda la superficie del anillo y conduce a revelar las discontinuidades orientadas en forma circunferencial. Esto se muestra esquemáticamente en la Fig.4-15 b.

Para lograr un máximo en el flujo (de la bobina) usualmente se inserta un núcleo de acero blando laminado en el hueco interior del anillo como se muestra en la .Fig (4-15 a).

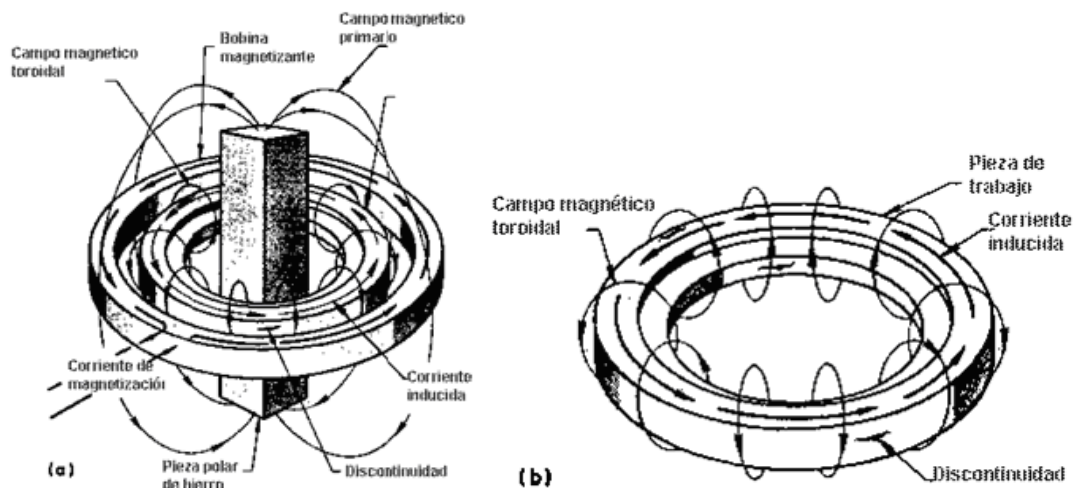


Fig 4-15 -: a) Método de magnetización por corrientes inducidas en piezas en forma de anillo. b) resultado de las corrientes inducidas y el campo magnético toroidal en el anillo

#### 4.4.2.2 Inducción indirecta.

La corriente eléctrica de magnetización se hace pasar por un conductor central, generalmente de cobre, que pasa a través de la pieza que se está probando. Los defectos que se encuentran son perpendiculares a la dirección del campo inducido.

La corriente no fluye a través de la pieza, sino en un conductor secundario; el flujo magnético es inducido en la pieza, la cual puede crear un flujo circular/toroidal, longitudinal o multidireccional.

- **Magnetización lineal.**

Llamada así porque en los yugos de AC o DC producen campos lineales entre sus polos.

Otra técnica de magnetización lineal es emplear una bobina (solenoides). Si se selecciona esta técnica, es importante procurar que la pieza llene lo más posible el diámetro interior de la bobina; problema que se elimina al enredar el cable de magnetización alrededor de la pieza. Entre mayor número de vueltas (espiras) tenga una bobina, presentará un mayor poder de magnetización (Fig. 4-16).

Las Bobinas o cable enrollado con uno o múltiples arrollamientos del conductor se utilizan para inspeccionar piezas longitudinalmente.

El campo dentro de la bobina tiene una dirección definida que corresponde a las direcciones de las líneas de fuerza producidas por cada porción del conductor. La densidad de flujo dentro de la bobina es proporcional al producto de la corriente “ $i$ ”, en Amper, y el número de vueltas de la bobina,  $N$ . Por esto la fuerza de magnetización puede ser variada cambiando ya sea la intensidad de corriente o el número de vueltas del arrollamiento.

Para grandes piezas, se puede armar la bobina arrollando el cable alrededor de la pieza con varias vueltas cuidando que las indicaciones no queden ocultas debajo del cable.

Comercialmente se venden bobinas que pueden ser conectadas a un equipo o suministro eléctrico. Partículas Magnetizables

Las fisuras transversales en ejes y árboles pueden ser detectadas fácilmente con bobinas. La mayoría de las bobinas usadas en magnetización son cortas, especialmente aquellas devanadas sobre marcos fijos. Se debe considerar la relación entre la longitud de la pieza y el ancho de la bobina.

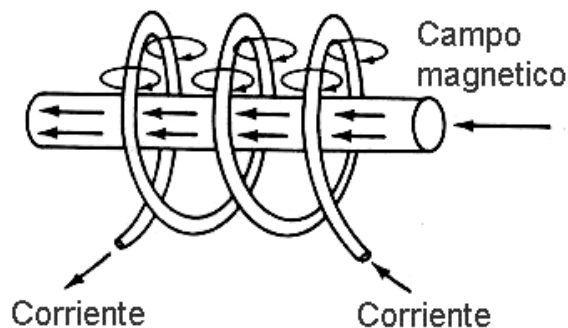


Fig. 4-16 Magnetización longitudinal con bobina.

- **Yugo electromagnético.**

Consisten en un arrollamiento sobre un cuerpo en forma de U hecho de hierro blando (chapas al Si). Sus patas pueden ser fijas o articuladas. Estas últimas sirven para variar la distancia de contacto y para adaptarse a diferentes geometrías de la pieza.

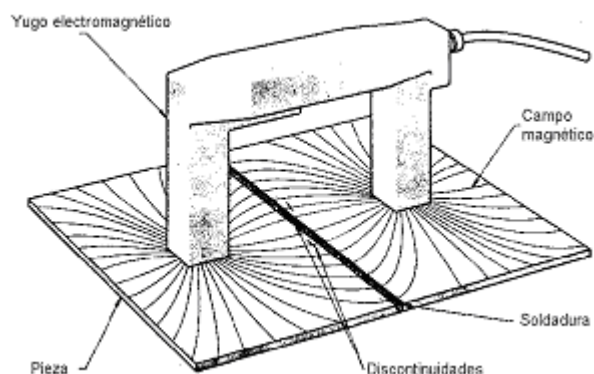
Una diferencia con los yugos permanentes es que los electroimanes pueden ser fácilmente encendidos o apagados lo que facilita separarlos de la pieza de ensayo. El



yugo puede estar diseñado para trabajar con CC, CA o ambas. La densidad de flujo producida por CC puede ser cambiado variando la intensidad de la corriente que fluye en la bobina.

Cuando se trabaja con CC, hay gran penetración del campo mientras que con C.A. el campo magnético se concentra en la superficie de la pieza, dando muy buena sensibilidad para discontinuidades superficiales sobre una amplia zona.

En general, las discontinuidades a ser reveladas deberían estar entre los dos polos del yugo y orientadas perpendicularmente a la línea imaginaria que los conecta (Fig. 4-17)



**Fig. 4-17: Electroimán (yugo).**

Se debe tener en cuenta que en la vecindad de los polos se producen escapes de campo que producen una aglomeración excesiva de partículas. Cuando se opera, la pieza cierra el circuito del flujo magnético entre los polos producidos por el yugo (fuente del campo).

Los yugos que utilizan CA. para la magnetización tienen numerosas aplicaciones y pueden también utilizarse para desmagnetizar.

- **Conductor central.**

En muchas piezas tubulares o en forma de anillos, es ventajoso el uso de un conductor separado para transportar la corriente de magnetización en lugar de usar la misma pieza para ello. A este conductor se lo denomina “conductor central”. Se lo coloca atravesando la pieza por su interior (Fig. 4-18) y es una manera conveniente para magnetizar circularmente sin que la pieza tenga un contacto

directo con el circuito eléctrico. Normalmente pueden ser sólidos o huecos, y de materiales ferromagnéticos o no ferromagnéticos.

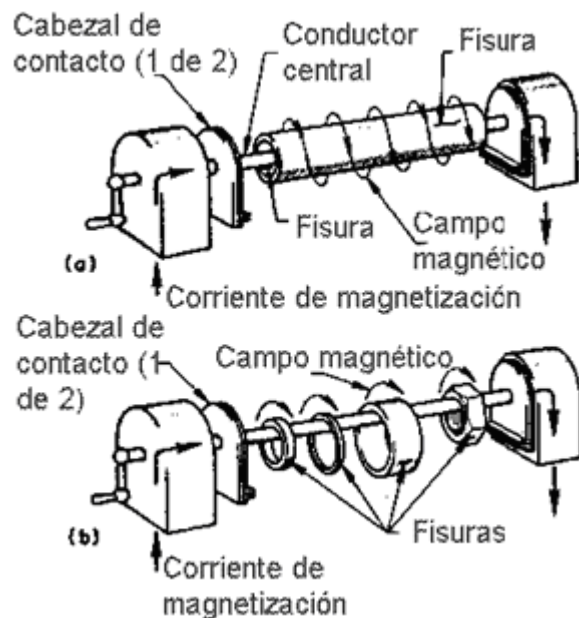


Fig. 4-18: Magnetización con conductor central.

Las reglas básicas en la consideración del campo magnético alrededor de un conductor por el que circula CC son:

- ☞ El campo magnético en el exterior de un conductor de sección transversal uniforme, es uniforme a lo largo de su longitud.
- ☞ El campo magnético está a  $90^\circ$  con respecto a la dirección de la corriente en el conductor.
- ☞ La densidad de flujo en el exterior del conductor varía inversamente con la distancia radial desde el centro del conductor.

- **Conductor Sólido no magnético; CC**

La distribución del campo magnético en el interior de un conductor no ferromagnético (por ej. una barra de cobre o aluminio) que transporta una CC es diferente a la distribución que tiene en su exterior. En cualquier punto en el interior de la barra, la densidad de flujo es el resultado de sólo la porción de corriente que está fluyendo en el metal entre el punto considerado y el centro de la barra. Por esto, la densidad de flujo se incrementa linealmente desde cero, en el centro de la barra, a un valor máximo en la superficie. Fuera de la barra el flujo disminuye a lo largo de una curva, como se muestra en la Fig.4-19 (a). Cuando se calcula la densidad de

flujo en el exterior, se puede considerar que la corriente está concentrada en el centro de la barra. Si el radio de la barra es  $R$ , la densidad de flujo  $B$ , en la superficie de la barra es igual a la fuerza de magnetización  $H$ . A una distancia  $2R$  del centro del conductor, la densidad de flujo  $B$  será  $H/2$ ; a  $3R$ ,  $H/3$ , etc.

- **Conductor: sólido ferromagnético: C.C:**

Si ahora el conductor es ferromagnético tal como una barra de acero u otro material ferromagnético, el campo magnético ( $H$ ) será igual que en un conductor no ferromagnético, pero la densidad de flujo ( $B$ ) será mucho mayor.

La Fig. 4-19 (b) muestra un conductor con el mismo diámetro mostrado en la Fig.4-19 (a). La densidad de flujo en el centro es cero, pero en la superficie será  $m.H$ , en donde  $m$  es la permeabilidad del material. La permeabilidad es la facilidad con que un material acepta al magnetismo. Por esto, la densidad de flujo puede ser muchas veces mayor a la de un material no-ferromagnético y sólo en la superficie exterior cae al mismo valor que en un conductor no-ferromagnético, decreciendo con la distancia y siguiendo la misma curva.

- **Conductor: sólido ferromagnético: C.A:**

En la Fig. 4-19 (c) se muestra la distribución del campo magnético en un conductor ferromagnético que transporta C.A. En la región exterior al conductor la densidad de flujo decrece de la misma forma que con C.C., sin embargo la C.A. esta variando constantemente en intensidad y dirección a medida que fluye. En el interior del conductor, la densidad de flujo es cero en el centro y se incrementa hacia la superficie, lentamente primero y acelerándose después hasta alcanzar el máximo en la superficie.

Este comportamiento es debido al “efecto pelicular” de la C.A.

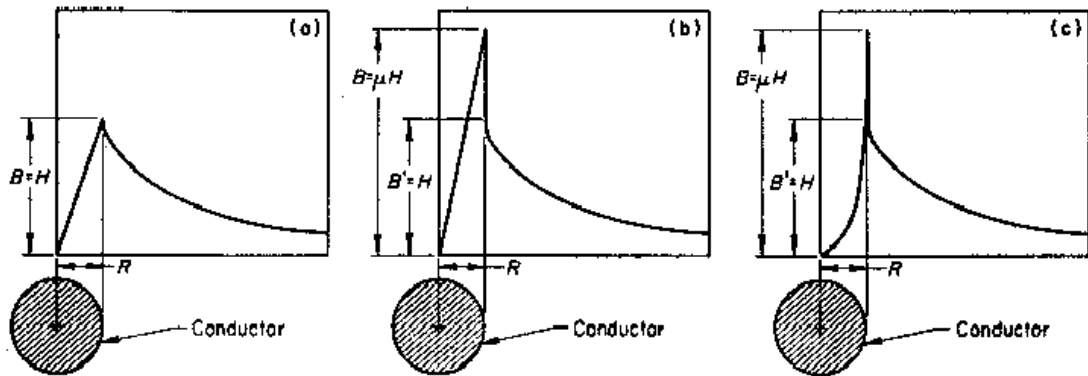


Fig. 4-19: Distribución del campo magnético dentro y fuera del conductor.  
 a) Conductor no magnético y CC.  
 b) Conductor ferromagnético y CC.  
 c) Conductor ferromagnético y CA

• **Conductor central en un cilindro ferromagnético hueco:**

Cuando se utiliza un conductor central para magnetizar una pieza cilíndrica hueca de un material ferromagnético, la densidad de flujo es máxima en la superficie interior de la pieza (Fig. 4-20).

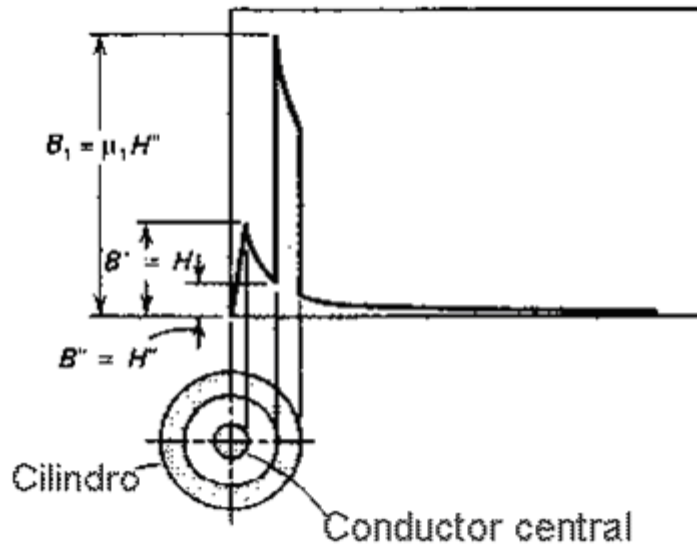


Fig. 4-20: Distribución de la densidad de flujo en y alrededor de un cilindro hueco de material ferromagnético, cuando se magnetiza con conductor central de material no ferromagnético y con CC.

La densidad de flujo producida por la corriente en el conductor central es máxima en la superficie del conductor (H) en la Fig.4-20 y luego decrece a lo largo de la misma curva exterior al conductor como se muestra en la Fig.4-19 a través del espacio entre el conductor y la superficie interior de la pieza. En esta superficie la densidad de flujo se incrementa inmediatamente por el factor de permeabilidad  $\mu$  del

material de la pieza y luego decrece hacia la superficie exterior. Acá la densidad cae nuevamente al mismo valor con que estaba decreciendo la curva interior.

Como se ve, esta técnica produce una densidad de flujo máxima en la cara interior de la pieza dando las indicaciones más fuertes en esta superficie. Algunas veces también pueden aparecer en la superficie externa.

La densidad de flujo en las caras de la pieza es la misma si se utiliza ya sea, un conductor ferromagnético o no ferromagnético. Si el eje del conductor central es colocado en el eje de la pieza, el campo magnético en la pieza será concéntrico en todas sus paredes. Sin embargo si el conductor es colocado descentrado en el interior de la pieza, la densidad de flujo en las paredes del cilindro será mucho más intenso en ese punto y más débil en el punto diametralmente opuesto.

En piezas cilíndricas pequeñas se prefiere centrar al conductor en la pieza de forma que se produzca un campo uniforme en todas las superficies. En piezas con grandes diámetros (tubos, anillos o recipientes a presión), la corriente necesaria para una magnetización adecuada se hace demasiado grande si el conductor está centrado, en este caso se usará el conductor descentrado Fig. 4-21.

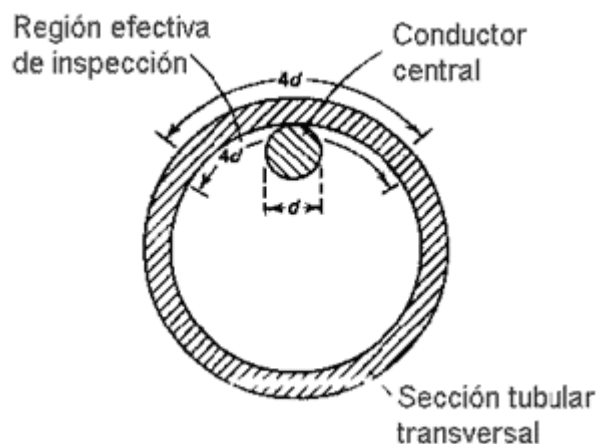


Fig. 4-21: Región efectiva de inspección cuando se utiliza un conductor descentrado.

Cuando el conductor es colocado contra una pared interior de la pieza, los requerimientos de corrientes dados en “Magnitud de la corriente Aplicada” se deben aplicar excepto que el diámetro será considerado la suma del diámetro del conductor central más dos veces el espesor de la pared.

La distancia a lo largo de la circunferencia de la pieza (interior y exterior) que es efectivamente magnetizada será tomada como cuatro veces el diámetro del conductor central como se ilustra en la Fig. 4-21. La circunferencia entera se inspecciona rotando la pieza sobre el conductor y solapando un 10 % de cada área inspeccionada.

El diámetro del conductor central no está relacionado con el diámetro interior o el espesor de pared de la pieza. El tamaño del conducto se basa generalmente en su capacidad para transportar corriente y en su fácil manejo. En algunos casos se pueden usar, conductores más grandes que el tamaño requerido para la capacidad de conducir la corriente solamente para facilitar su centrado dentro de la pieza.

#### **4.4.2.3 Método residual.**

El medio se aplica después que la pieza ha sido magnetizada y suspendida, la fuerza magnetizante depende totalmente de la cantidad de magnetismo residual en la pieza, no es usado en aleaciones pobres de acero, que tienen poca retentividad. En este método se aplica un medio húmedo ya sea por baño o inmersión.

#### **4.4.2.4 Método continuo.**

Para la inspección de piezas con alta permeabilidad y baja retentividad, como es el caso de los aceros al carbono o sin tratamiento térmico de endurecimiento, es recomendada la técnica de magnetización continua; esto es, mantener el paso de la energía eléctrica mientras se efectúa la inspección.

#### **4.4.2.5 Magnetización circular.**

Cuando la pieza es de forma regular (cilíndrica), se puede emplear la técnica de cabezales, que produce magnetización circular y permite la detección de defectos paralelos al eje mayor de la pieza. Una variante de esta técnica es emplear contactos en los extremos de la pieza, que permiten obtener resultados similares. Otra forma de provocar un magnetismo circular es emplear puntas de contacto, pero sólo se recomienda su empleo para piezas burdas o en proceso de semiacabado. Se deben utilizar puntas de contacto de aluminio, acero o plomo para evitar los depósitos de cobre, que pudieran iniciar puntos de corrosión. Esta técnica permite cierta movilidad con los puntos de inspección, pudiéndose reducir la

distancia hasta 7 cm entre los polos o aumentarse hasta 20 cm, con lo cual es factible inspeccionar configuraciones relativamente complicadas (ver Fig. 4-14).

**4.4.2.6 Magnetización longitudinal.**

Se basa en la inducción de un campo longitudinal dentro de la pieza, creado por una bobina. La magnetización longitudinal localiza discontinuidades transversales. La cantidad de corriente necesaria para magnetización longitudinal con una bobina es determinada por la formula:

$$No.Amper = \frac{4200D}{LT}$$

Donde:

*L* = longitud de la pieza en pulgadas.

*D* = Diámetro en pulgadas.

*T* = Numero de vueltas en la bobina.

En la tabla de abajo se dan las aplicaciones generales, ventajas y limitaciones de varias técnicas de magnetización de piezas.

**Tabla 4-2 resumen de Aplicaciones generales, ventajas y limitaciones de varias técnicas de magnetización.**

<b>APLICACIONES</b>	<b>VENTAJAS</b>	<b>LIMITACIONES</b>
<b>BOBINAS</b> (uno o múltiples arrollamientos)		
Piezas de tamaño medio en los cuales predomina su longitud (cigüeñales, ejes)	Las superficies son magnetizadas longitudinalmente para detectar discontinuidades transversales	Las piezas deberán estar centradas en la bobina para maximizar la magnetización efectiva. Si la longitud así lo requiere pueden necesitarse nuevos disparos después de reposicionar la bobina.
Grandes fundiciones, forjadas o ejes.	La magnetización longitudinal se puede realizar arrollando el cable sobre la pieza	Se puede requerir múltiples posicionamientos por la geometría de la pieza.
Piezas pequeñas	Fácil y rápido, especialmente cuando se necesita aplicar el método residual. No hay contacto con la pieza. Piezas relativamente complejas pueden procesarse como una pieza con sección transversal simple.	La relación long./diám. (L/D) es importante para determinar los Amper/vuelta necesarios; la relación L/D puede ser modificada utilizando piezas suplementarias de igual sección transversal. La sensibilidad disminuye en los extremos (perdida de campo). Es

## ***Herramientas y técnicas del mantenimiento Predictivo.***

		aconsejable el método de Quick break cuando L/D es pequeño.
<b>YUGOS</b>		
Inspección de grandes áreas para encontrar discontinuidades superficiales	No hay contacto eléctrico; Muy portátil. Localiza discont. en cualquier dirección con el posicionamiento del yugo adecuado	Consume mucho tiempo. El yugo debe ser sistemáticamente reposicionado para detectar discont. al azar.
Piezas que requieren inspección localizada	No hay contacto eléctrico Buena sensibilidad para discont. Superficiales	El yugo debe ser posicionado adecuadamente en relación a la orientación de la discontinuidad. Debe haber buen contacto entre la pieza y los polos de yugo; puede ser difícil en piezas de geometría complicada. Baja sensibilidad para discont. Subsuperficiales, excepto en áreas aisladas.
<b>CONDUCTOR CENTRAL</b>		
Piezas cortas que tengan agujeros en los cuales se pueda pasar el cable (aros de cojinetes, cilindros huecos, engranajes, grandes tuercas, etc.)	No hay contacto eléctrico. (evita el quemado). Se crea un campo circunferencial en todas las superficies que rodean al conductor. Ideal para cuando hay que aplicar el método residual. Piezas livianas pueden ser sostenidas por el conductor central. Se pueden utilizar varias vueltas para reducir la cantidad de corriente requerida.	El tamaño del cable debe ser suficiente para conducir la corriente requerida. Idealmente el conductor debe ser centrado en el agujero. Diámetros grandes requieren colocar el conductor cerca de la superficie interior e ir rotando la pieza. Cuando se aplica el método continuo, se requiere inspección después de cada posicionamiento.
Largas piezas tubulares (caños, tuberías, ejes huecos)	No hay contacto eléctrico. Pueden ser inspeccionadas las superficies interior y exterior. La longitud total de la pieza es magnetizada circunferencialmente.	La sensibilidad de la superficie externa puede ser algo inferior a la interna para grandes diámetros y espesores de pared gruesos.
Grandes cuerpos de válvulas y piezas similares.	Buena sensibilidad para discontinuidades en la superficie interior	Ídem que para pieza largas tubulares.
<b>CONTACTO DIRECTO ENTRE CABEZALES.</b>		
Piezas sólidas relativamente pequeñas (fundidas, forjadas y maquinadas) que pueden ser inspeccionadas en un banco horizontal por el método húmedo.	Rápido, de procesamiento fácil. Campo circular completo alrededor del paso de corriente. Buena sensibilidad para discont. Superficiales y cercanas a la superficie. Piezas simples como relativamente	Posibilidad de quemado de la pieza si las condiciones de contacto no son las adecuadas. Piezas largas deben ser inspeccionadas por partes para facilitar la aplicación del baño de partículas, sin recurrir a disparos excesivamente largos de corriente.



## *Herramientas y técnicas del mantenimiento Predictivo.*

	complejas pueden ser inspeccionadas con uno o más disparos.	
<b>CONTACTO DIRECTO CON PINZAS Y CABLES.</b>		
Grandes fundiciones y forjados	Superficies grandes se pueden inspeccionar en tiempos relativamente cortos.	Se requieren equipos que proporcionen altos amperajes (8000-20000 A).
Largas piezas tubulares (caños, tuberías, ejes huecos)	La pieza puede ser magnetizada circularmente por contacto extremo a extremo.	El campo efectivo está limitado a la superficie exterior, no a la interior. Los extremos deben tener una forma adecuada para colocar los contactos y deben conducir la corriente sin un calentamiento excesivo.
Piezas sólidas largas ( barras, ejes)	La pieza puede ser magnetizada circularmente por contacto extremo a extremo. Los requerimientos de corriente son independientes de la longitud. No hay pérdidas de campo en los extremos	Los requerimientos de voltaje crece con la impedancia del cable u de la longitud de la pieza. Los extremos deben tener una forma adecuada para colocar los contactos y deben conducir la corriente sin un calentamiento excesivo.
<b>PUNTAS</b>		
Soldaduras, para fisuras, inclusiones, raíces abiertas, o inadecuadas penetración	Se puede dirigir selectivamente un campo circular al área soldada. Usando corriente de media onda y partículas secas se obtiene una excelente sensibilidad para discontinuidades subsuperficiales y superficiales. Todo el equipo es portátil	Se puede inspeccionar de una vez solamente un área pequeña. Se puede producir quemado por arcos. La superficie debe estar seca cuando se una partículas secas. El espaciado entre puntas debe estar en acordancia con los niveles de corriente de magnetización requerido.
Grandes fundiciones y forjados	Se puede inspeccionar la superficie total a través de pequeños incrementos usando valores de corriente nomina. El campo magnético circular puede ser concentrado en un área específica. Todo el equipo es portátil	La cobertura de grandes áreas puede llevar mucho tiempo. Se puede producir quemado por arcos. La superficie debe estar seca cuando se una partículas secas. El espaciado entre puntas debe estar en acordancia con los niveles de corriente de magnetización requerido.
<b>CORRIENTES INDUCIDAS</b>		
Piezas de forma circular, para discontinuidades circunferenciales	No hay contacto eléctrico. Toda la pieza esta sometida a un campo magnético toroidal donde se cubre el 100% en una sola magnetización. Puede ser automatizado.	Se requiere un núcleo laminado para aumentar el camino de magnetización. El tipo de corriente de magnetización debe ser compatible con la dureza o suavidad magnética del material inspeccionado.. Se deben evitar otros campos circundantes.

## ***Herramientas y técnicas del mantenimiento Predictivo.***

Esferas	No contacto eléctrico. Permite una cobertura del 100% para indicaciones en cualquier dirección usando un proceso en tres etapas con reorientación de la esfera entre cada una de ellas. Se puede automatizar.	Para esferas de diámetro pequeño el uso se limita al método de magnetización residual.
Discos y engranajes	No contacto eléctrico. Buena sensibilidad en o cerca de la periferia o borde. La sensibilidad en áreas diferentes puede ser variada seleccionando un núcleo o pieza polar. Junta con corriente de media onda y partículas secas da excelente sensibilidad para discontinuidades subsuperficiales.	La cobertura del 100% puede requerir de un proceso de dos etapas. El tipo de corriente de magnetización debe ser compatible con la dureza o suavidad magnética del material inspeccionado.

Tabla 4-2: ventajas y limitaciones de varias técnicas de magnetización.

### **4.4.2.7 Equipos utilizados en partículas magnéticas.**



Fig. 4-22: Equipo para ensayos con partículas magnéticas.



Fig. 4-23. Yugo electromagnético, Flujo que magnetiza: CA/CC. Energía de entrada: 110 /230 V.



Fig. 4-24: Yugo Imán permanente con su caja de transporte.



Fig. 4-25: Lámpara portátil de 150 W, alta resistencia a impacto y alta intensidad sin requerimiento de un transformador externo ( $4.500 \mu\text{W}/\text{cm}^2$  a  $15^\circ$ ). Alimentación directa a 230/240 V con cable de seguridad de 2,5 m (opcional, 6 y 9 m). Incluye sistema de protección de bombilla y de sujeción del filtro que permite un cambio rápido de ambos sin herramientas.



Fig. 4-26: Dispensadores de polvo Botes y peras Dispensadores manuales para polvo revelador.



Fig. -4-27: Conjunto de probetas con defectos tipo o especiales Colección de probetas con defectos típicos o específicos requeridos. Disponibles probetas en distintos materiales (acero, aluminio, etc.), con geometrías diferentes y con defectos característicos de procesos de moldeo, forja, soldadura, etc.



Fig. 4-28: Medidores analógicos de campo magnético residual ( $\pm 10$  G y  $\pm 20$  G). Conformes con ASTM E-1444.



Fig 4-29: Banco para ensayos con cabezales con ajuste neumático para piezas de hasta 400 mm de longitud. Incluye bobina desplazable de 305 mm (disponibles también de 406 y 508 mm) y permite la operación con AC y FWDC (conforme a ASTM E-1444). Armario de control con interruptores para selección y depósito de 15 litros con agitador y bomba de circulación. con función de desmagnetización automática.

### **4.4.3 Aplicación de las partículas magnéticas.**

En general, existen dos principales medios o mecanismos mediante los cuales se puede aplicar las partículas magnéticas, estos son: vía húmeda y vía seca. Cuando las partículas se aplican en vía húmeda se utiliza un atomizador como el mostrado en la Fig. 4-26, éstas normalmente se encuentran suspendidas en un medio líquido tal como el aceite o el agua. En la aplicación de las partículas magnéticas vía seca, éstas se encuentran suspendidas en aire.

Tipo de partículas. - Por término general, se prefieren las partículas secas cuando se requiere detectar discontinuidades relativamente grandes. Las partículas en suspensión se emplean preferentemente para detectar discontinuidades muy pequeñas y cerradas.

Color de las partículas.- Dependerá de contraste de fondo. De este modo se emplearán partículas de color oscuro (negras o azules) para piezas recién maquinadas y partículas de colores claros (grises o blancas) para piezas con superficies oscuras.

Las partículas de color rojo están en un punto intermedio y fueron desarrolladas para que su observación se facilite empleando una tinta de contraste blanco; esta tinta tiene un color y consistencia parecidos al del revelador no acuoso de los PT, pero con mayor poder de adherencia.

En General, existen dos principales tipos de partículas magnéticas: aquellas que son visibles con luz blanca natural o artificial como las descritas en el párrafo anterior y aquellas cuya observación debe ser bajo luz negra o ultravioleta con el uso de una lámpara(ver Fig. 4-25), conocidas comúnmente como partículas magnéticas fluorescentes.

Cuando se desea una mayor sensibilidad en un método, es necesario emplear las partículas fluorescentes.

Cada medio de aplicación (húmedo o seco) es decir el material a través del cual las dispersiones en el campo magnético se hacen visibles y que pueden aplicarse sobre la pieza debe poseer las siguientes características:

1. Deben tener alta permeabilidad para ser fáciles de magnetizar, tener baja retentividad para no ser atraídas unas a otras y evitar su aglomeración.
2. Control de tamaño y forma: redondas y alargadas.
3. No deben ser tóxicas.
4. Deben estar libres de moho, grasa, pintura, suciedad y otros materiales extraños.
5. Deben tener buena visibilidad; visibles y fluorescentes.

Cada tipo de partículas magnéticas (visibles o fluorescentes) tiene sus ventajas y desventajas. El medio y el tipo de partícula a utilizar lo determinan distintos factores entre ellos podemos enunciar: el tamaño de las piezas a inspeccionar, el área a inspeccionar, el medio ambiente bajo el cual se realizará la prueba, el tipo de discontinuidades a detectar y el costo.

Las partículas se aplican conforme se realiza la inspección, para lo que existen dos prácticas comunes que son:

- ☘ Si se emplean partículas secas, primero se hace pasar la corriente de magnetización y al mismo tiempo se rocían las partículas.
- ☘ Si se emplean partículas en suspensión, primero se aplica la solución<sup>3</sup> ya sea atomizada o aplicando con brocha sobre la superficie a inspeccionar e inmediatamente se aplica la corriente de magnetización.

Generalmente se recomienda que la corriente de magnetización se mantenga durante el tiempo de aplicación de las partículas, ya que es cuando el campo magnético es más intenso y permite que las partículas sean atraídas hacia cualquier distorsión o fuga de campo, para así indicar la presencia de una posible discontinuidad.

El éxito de la prueba dependerá de la selección del medio y del método utilizado para el desarrollo no olvidando revisar que todo el equipo funcione correctamente, si se tiene duda

---

<sup>3</sup> La solución para partículas suspendidas en un vehículo se prepara de la siguiente manera: en agua destilada jabonosa se mezcla con micropolvos de óxido de hierro  $F_2O_3$  que posee cualidades magnéticas, con un tamaño del grano de 10 a 50 micrones en una concentración aproximada a los 10 gramos de polvo por litro de agua.

## *Herramientas y técnicas del mantenimiento Predictivo.*

se debe calibrar o verificar con el kit de probetas típicas con defectos como el que se muestra en la Fig. 4-27.

	<b>USOS</b>	<b>VENTAJAS</b>	<b>DESVENTAJAS</b>
PARTÍCULAS SECAS	Son usadas tal como se suministran. Se aplican por aspersión o espolvoreado. Se pueden utilizar bajo condiciones ambientales extremas (frío o calor). Son mejores para detectar discontinuidades subsuperficiales.	Poseen superior movilidad con HDWC. Son fácil de removerse. Color: rojo, negro, gris, azul, verde, naranja. <u>Se selecciona el color que mayor contraste haga con la superficie a inspeccionar.</u>	Menor probabilidad de detección de discontinuidades finas. Difícil de usar en magnetizaciones en sobrecabeza. No existe evidencia de cobertura completa en la superficie de la pieza que se inspecciona. Promedio menor de producción de piezas inspeccionadas. Difícil de adaptar a sistemas de inspección automática. Existe probabilidad de inhalarlas, se requiere usar cubrebocas.
PARTÍCULAS HUMEDAS EN SUSPENSION	Son suspendidas en un vehículo, como agua acondicionada o un destilado ligero de petróleo a una concentración dada. Se aplican por aspersión o por baño. Las hay fluorescentes y no fluorescentes. Se suministran secas o premezcladas en un concentrado en agua o con el destilado de petróleo. Generalmente se utilizan en unidades horizontales.	<b>Las partículas visibles o no fluorescentes:</b> Son de color negro o café rojizo. La concentración inicial del baño debe ser como lo indique el fabricante y verificarse por decantación diariamente.	
PASTA MAGNÉTICA PARA UNTARSE	Las partículas están suspendidas en un aceite viscoso (pesado). Se aplican con brocha antes de magnetizar. Facilita la inspección en posición sobre cabeza o vertical El vehículo es combustible, pero el riesgo ante el fuego es muy bajo.		

**Tabla 4-3: Cuadro resumen del uso de partículas magnéticas.**

El personal que realiza este tipo de pruebas, generalmente debe realizar un análisis de los factores anteriores para determinar cuál es el medio y tipo óptimo de partícula magnética a utilizar para cierta aplicación específica.

#### **4.4.4 La desmagnetización de una pieza.**

Remover el magnetismo de un dispositivo. Suele utilizarse el término inglés Degauss para hacer referencia a desmagnetizar.

Se debe tener claro que dentro de la microestructura de los materiales ferromagnéticos, hay regiones con la misma orientación magnética denominadas dominios magnéticos. Cuando el material está desmagnetizado, el conjunto de dominios se encuentra desordenado y en promedio, el material no tiene magnetización remanente. Pero cuando este material se somete a un campo magnético externo, los dominios se orientan cambiando su tamaño relativo y llegando incluso a girar, y generando calor (disipación por histéresis magnética). Al retirar el campo, no todos los dominios quedan orientados al azar, pues se requiere más energía para poder cambiarlos de posición. Por lo tanto, queda una orientación neta, una magnetización remanente o residual. Se dice que el material está (parcialmente) magnetizado.

Una forma de desmagnetizar totalmente un material ferromagnético sería por medio de la activación térmica: hacer que su temperatura alcance la Temperatura de Curie  $T_C$ . La temperatura de Curie para un material típico de los que se ensayan con las partículas magnéticas necesitarían una gran temperatura por lo que no es muy conveniente este método pero afortunadamente existe otro que igualmente desordena los dominios magnéticos a diferencia que lo hace a temperatura ambiente, está basado en:

- 1) Cuando se aplica un campo magnético, el material magnético se magnetiza todo lo que la energía suministrada por el campo le permita.
- (2) Si el campo se retira súbitamente, el material queda con una magnetización un poco menor.
- (3) Si se aplica un campo opuesto, no se anula la magnetización, sino que el material se magnetiza con la misma intensidad, pero en sentido opuesto.

Este es el principio de grandes desmagnetizadores como el de la Fig. 4-29.



Esto significa que la forma de eliminar la magnetización residual consiste en seguir etapas de menor magnetización en forma sucesiva, alternada y decreciente, para que el material progresivamente vaya quedando con menor remanencia en cada ciclo.

Específicamente, lo que se busca es someter al material a ciclos de histéresis sucesivos, mediante un campo alterno (AC) decreciente donde cada ciclo tiene menor amplitud que el anterior, de modo que la estructura de dominios vaya desordenándose gradualmente, hacia una configuración -en promedio- casi sin remanencia.

En la Fig.4-30 en la parte inferior se muestra que si la corriente  $I(t)$  es oscilatoria decreciente, el campo  $H(t)$  que genera (por la Ley de Ampere), es igualmente oscilatorio y decreciente. En la parte superior izquierda de la Figura se muestra esquemáticamente el ciclo de histéresis que recorre la magnetización  $M(t)$  del material del núcleo, después de haber sido saturado por el primer pulso del desmagnetizador. Los sucesivos puntos A, B, C, ... indican cómo va reduciéndose la magnetización residual en cada ciclo.

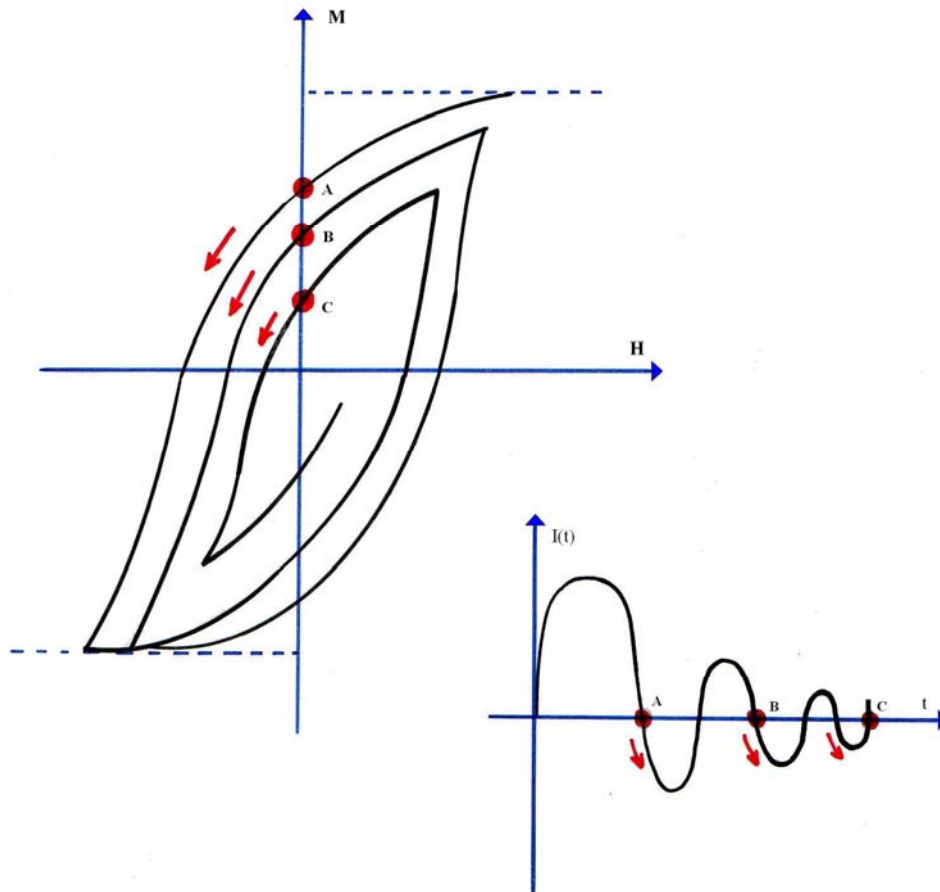


Fig. 4-30 Curva de Histéresis.

Después de haber realizado el ensayo de partículas magnéticas es necesario volver a dejar las piezas a las condiciones de estado inicial. Esta ***será efectiva***, si la secuencia para desmagnetizar una pieza es la siguiente y se logra cumplir:

- ❖ “Aplicar un campo magnético con un valor pico mayor al usado durante la inspección, enseguida decrecerlo gradualmente e invirtiendo alternadamente su dirección; repitiendo este proceso hasta obtener un valor mínimo aceptable de magnetismo residual”

Para lograr una desmagnetización adecuada es necesario observar lo siguiente:

- ❖ Se requieren de 10 a 30 pasos alternos de reducción e inversión de la corriente eléctrica.
- ❖ Usar el mismo tipo de corriente empleada durante la inspección.
- ❖ El flujo magnético producido debe ser cercanamente igual en la misma dirección que el empleado durante la inspección.
- ❖ Preferentemente orientar la pieza de este a oeste. Comprobar su correcta desmagnetización con un Medidores analógicos de campo magnético residual como el de la Fig 4-28.

## **4.5 Ventajas de las partículas magnéticas.**

Con respecto a la inspección por líquidos penetrantes, este método tiene las siguientes ventajas:

- ☞ Requiere de un menor grado de limpieza; por ejemplo que los líquidos penetrantes.
- ☞ Generalmente es un método más rápido y económico.
- ☞ Tiene una mayor cantidad de alternativas.
- ☞ Se puede inspeccionar las piezas en serie obteniéndose durante el proceso, resultados seguros e inmediatos.
- ☞ La inspección es más rápida que los líquidos penetrantes y más económicos.

- ☞ Equipo relativamente simple, provisto de controles para ajustar la corriente, y un amperímetro visible, conectores para HWDC, FWDC y AC.
- ☞ Portabilidad y adaptabilidad a muestras pequeñas o grandes.
- ☞ Detecta tanto discontinuidades superficiales y subsuperficiales.
- ☞ Las indicaciones son producidas directamente en la superficie de la pieza, indicando la longitud, localización, tamaño y forma de las discontinuidades.
- ☞ El equipo no requiere de un mantenimiento extensivo.
- ☞ Mejor examinación de las discontinuidades que se encuentran llenas de carbón, escorias u otros contaminantes y que no pueden ser detectadas con una inspección por Líquidos Penetrantes.

#### **4.6 Limitaciones de las partículas magnéticas.**

- ☞ Es aplicable solamente a materiales ferromagnéticos; en soldadura, el metal depositado debe ser también ferromagnético.
- ☞ No tienen gran capacidad de penetración; hasta dos milímetros por debajo de la superficie.
- ☞ El manejo del equipo en campo puede ser caro y lento.
- ☞ Generalmente requieren del empleo de energía eléctrica (Fuente de poder).
- ☞ Sólo detectan discontinuidades perpendiculares al campo.
- ☞ No detectará discontinuidades que se encuentren en profundidades mayores de 1/4”.

- ☞ La detección de una discontinuidad dependerá de muchas variables, tales como la permeabilidad del material, tipo, localización y orientación de la discontinuidad, cantidad y tipo de corriente magnetizante empleada, tipo de partículas, etc.
- ☞ La aplicación del método en el campo es de mayor costo.
- ☞ La rugosidad superficial puede distorsionar las líneas de flujo.
- ☞ Se requieren dos o más inspecciones secuenciales con diferentes magnetizaciones.
- ☞ Generalmente después de la inspección se requiere de una desmagnetización.
- ☞ Debe tenerse cuidado en evitar quemadas por arco eléctrico en la superficie de la pieza con la técnica de puntas de contacto.
- ☞ Aunque las indicaciones formadas con partículas magnéticas son fácilmente observables, la experiencia en el significado de su interpretación es muchas veces necesario.

## **4.7 Otros métodos de inspección.**

Varios métodos de inspección con partículas magnetizables han desarrollado para aplicaciones específicas. Tres de estos métodos se describen a continuación:

### **4.7.1 Inspección con gomas magnéticas.**

Este método utiliza partículas magnetizables muy finas, dispensas en gomas especialmente formuladas para curar a temperatura ambiente. Esto se aplica sobre la superficie a inspeccionar y luego es magnetizada.

Las partículas son atraídas por los campos de fuga de las discontinuidades. Luego que la goma cura (alrededor de 1 hora), la réplica sólida se retira de la pieza y se examina ya sea visualmente o con un microscopio de bajo aumento en busca de acumulación de partículas, correspondiente a indicaciones de discontinuidades superficiales o subsuperficiales.

#### **4.7.1.1 Ventajas:**

Este método de inspección amplía y complementa a otros métodos no destructivos en áreas problemáticas como: Regiones con limitada accesibilidad para la visualización. Superficies cubiertas zonas que, por sus geometrías o tamaños, son difíciles de inspeccionar. Indicaciones que necesitan de una amplificación para ser detectadas o interpretadas.

Estas replicas proveen evidencias de la calidad de maquinado, dimensiones físicas y condiciones superficiales. Las replicas también se pueden utilizar para detectar y registrar la iniciación y crecimiento de fisuras de fatiga en distintos períodos de un ensayo de fatiga. Este método da un registro permanente de la inspección, pero debido a posibles deterioros lentos durante el almacenaje, las mediciones críticas deberían ser hechas dentro de las 72 horas posteriores al ensayo.

Las replicas que sean almacenadas por períodos muy prolongados, podrían requerir una limpieza suave con solvente para remover cualquier secreción de fluido que se produzca.

#### **4.7.1.2 Limitaciones:**

Este proceso se limita sólo para la detección de discontinuidades superficiales y subsuperficiales en materiales ferromagnéticos. En materiales no magnéticos se utiliza solamente para evaluar la topografía de la superficie obteniéndose condiciones de la superficie, marcas de herramientas y dimensiones físicas pero sin que haya migración de las partículas.

La inspección con gomas magnéticas, no es un método tan rápido como otros debido al tiempo de curado, pero esto no es tan desventajoso cuando hay que inspeccionar un gran número de piezas ya que luego del limpiado, vaciado y magnetizado, las primeras replicas generalmente ya han curado y estarían listas para su remoción y examinación.

#### **4.7.1.3 Procedimiento:**

Se puede dividir en tres etapas:

Preparación de la pieza antes de la inspección.

Catalización, vaciado y magnetización

Observación e interpretación de la réplica curada.

##### *1. Preparación de la pieza:*

Se limpia la zona a inspeccionar de suciedad y contaminación. Generalmente no es necesario remover pintura o recubrimientos metálicos, aunque su eliminación intensificaría

cualquier indicación. Si los espesores de los recubrimientos son mayores a 0,25 mm deberían ser retirados.

La siguiente etapa es la preparación del reservorio para contener a la goma líquida sobre el área de inspección. Esto se puede realizar con papel de aluminio o tubos de plástico sellando el área para evitar pérdidas.

*2. Catalización y vaciado:*

Antes de su utilización, el material y las partículas (óxidos negros) deben ser totalmente mezclados para obtener una dispersión homogénea. Luego se le agrega el agente curador perfectamente medido y se vierte todo en el reservorio preparado,

*3. Magnetización:*

A continuación se magnetiza en forma continua o residual con imanes permanentes, con corriente continua a través de la pieza, con yugos, bobinas, puntas o conductor central. Lo más adecuado es el uso de yugos con C.C.

Dado que las partículas se deben moverse dentro de la goma líquida, los tiempos de magnetización son mayores que en el método standard. La mínima densidad de flujo sobre la superficie de la pieza es de 2 mT (20 G). Densidades de flujo mayores disminuyen en tiempo requerido y varía con cada inspección.

**Procedimiento alternativo.**

Otro procedimiento usado en la inspección con gomas magnéticas es la colocación de una película plástica fina (cloruro de polivinilideno, por ejemplo) entre la pieza de ensayo y la goma. Este se puede llevar a cabo estirando el film plástico sobre el área de inspección y pintando con la goma (catalizada o no) una fina capa sobre él. El film puede ser removido inmediatamente después de la magnetización para su inspección, eliminando así el tiempo de curado.

Otras ventajas de este método son:

No requiere un reservorio

La limpieza final es mucho más fácil.

Se puede utilizar una goma no catalizada (cuando no se requiere registro)

Si se desea un registro permanente, se utiliza la goma catalizada.

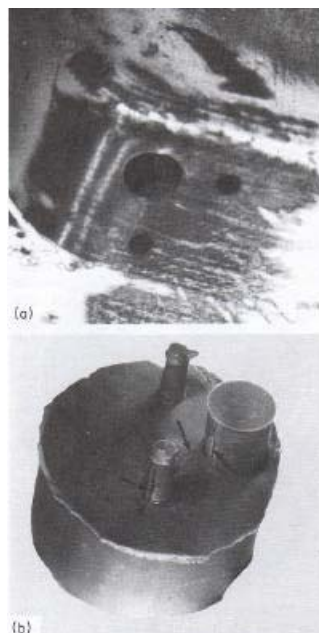
Las desventajas de esta técnica son que es menos sensible que el método convencional y más difícil de aplicar sobre superficies irregulares.

### **Utilización en áreas de accesibilidad residual limitada.**

Ejemplos de estas áreas son orificios y superficies internas de componente tubulares.

Orificios de pequeños diámetros y/o roscados, pueden ser muy difíciles de inspeccionar con otros métodos no destructivos que requieran accesibilidad visual (y de iluminación adecuada).

Los orificios ciegos también presentan dificultad tanto para P.M. convencional como para L.P. pues los fluidos se acumulan en el fondo enmascarando esa zona. La Fig. 4-31 muestra un ejemplo.



**Fig. 4-31: Vista de orificios ciegos en una pieza.**

### **4.7.2 Impresión magnética.**

Este método emplea una bobina de magnetización (impresora), partículas magnetizables y un recubrimiento plástico de la superficie de la pieza.

El proceso puede ser usado sobre materiales de piezas con muy baja retentividad magnética. La bobina o impresora magnética consiste en un arrollamiento plano de un material conductor y es conectado a una fuente capaz de entregar alto amperaje y bajo voltaje a 60 Hz.

Cuando la bobina se conecta, produce un campo magnético pulsante distribuido a lo largo de su eje que produce un efecto vibratorio sobre la pieza y las partículas. Este efecto de vibración hace que las partículas “manchen” o imprimir el recubrimiento plástico donde las

partículas han sido atraídas por cambios en la permeabilidad magnética. Las partículas son óxidos de hierro ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) y son similares a las utilizadas en el método convencional.

Los patrones de partículas impresos son visualizados porque anteriormente la superficie fue rociada con un recubrimiento plástico blanco que da el contraste. Después que la impresión se obtuvo y las partículas han sido removidas, el patrón puede fijarse rociando con un recubrimiento plástico transparente. Ambos recubrimientos tienen la misma composición formando un solo film y donde las indicaciones quedan tipo “sándwich”.

Cuando el recubrimiento se seca, se puede extraer la pieza.

#### **4.7.2.1 Procedimiento:**

Se limpia la pieza de impurezas, grasas, etc y se le aplica el recubrimiento blanco que se deja secar.

Se coloca la pieza adyacente a la bobina y se colocan las partículas secas espolvoreando con un aplicador.

La pieza y la bobina se pueden mover de tal forma de obtener una impresión uniforme. Luego que ésta se ha formado (alrededor de 6 a 12 segundos). Se corta la corriente, se quita el exceso de partículas con aire suave o un suave golpeteo.

Si las indicaciones no son buenas, se puede borrar con una esponja y repetir la operación.

Si la impresión es satisfactoria, se aplica por spray otra capa de recubrimiento plástico transparente para obtener un registro permanente y se despegan ambas.

Esta técnica puede ser aplicada a materiales con alta o baja retentividad para detectar. Cualquier condición que afecte a la permeabilidad magnética.

Algunas aplicaciones típicas pueden ser:

Deformaciones elásticas y plásticas.

Detección de fisuras.

Detalles metalúrgicos.

Zona afectada por el calor.

#### **4.7.3 Pinturas magnéticas:**

Son lodos tipo pinturas con partículas incorporadas:

Se aplican pincelando la superficie o zona de interés y luego se magnetiza. Las indicaciones negras aparecen por contraste sobre un fondo ligeramente gris. También pueden ser



fluorescentes. Estas indicaciones son semipermanentes o sea pueden permanecer intactas durante largos períodos a menos que se le borre intencionalmente.

#### **4.7.3.1 Ventajas**

Este método no requiere iluminación especial y es compatible con los métodos continuos: y residual, no se seca y, dependiendo del grado de claridad requerida, se puede remover con un trapo seco, papel o solvente.

La pintura magnética puede cubrir igualmente bien superficies coloreadas tanto claras como oscuras. El contraste entre las indicaciones y el fondo es independiente del color de la pieza.

A diferencia con las partículas secas, velocidades altas de aire y superficies mojadas no afectan a este método.

La pintura magnética puede ser aplicada sobre una pieza sumergida en agua y no se requiere de limpieza de aceite, óxido, recubrimientos, pinturas, etc.

Dado que la pintura magnética es un lodo con la consistencia de una pintura, se puede aplicar con pincel sobre la superficie de la pieza sin importar su orientación. Esta es una buena característica cuando el ensayo debe realizarse en paredes verticales o sobre cabeza.

La pieza puede ser repintada borrando las indicaciones y reprocesada sin lodo adicional.

#### **4.7.3.2 Ejecución:**

Las pinturas magnética pueden ser utilizadas con todas las técnicas de magnetización (circular, bobina, pintar, etc) utilizando CC o CA y para la detección de discontinuidades superficiales y subsuperficiales.

La formación de los materiales utiliza partículas en forma de láminas dispersas en un vehículo oleoso y viscoso. La viscosidad del medio se elige para restringir la movilidad lateral de las láminas ferromagnéticas, permitiendo su rotación en los defectos cuando sobre ellas actúa un campo de fuga (Fig. 4-32).

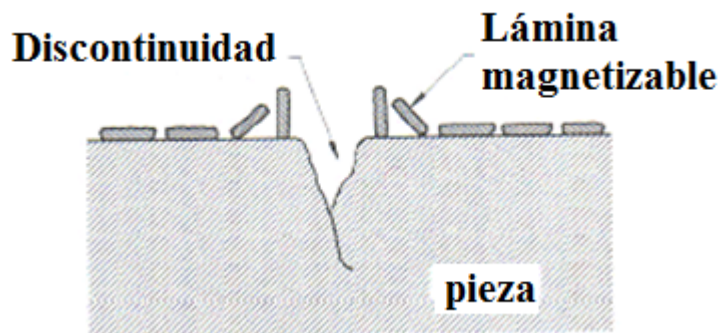


Fig. 4-32: Pinturas magnéticas; las láminas ferromagnéticas, permitiendo su rotación.

La pintura magnética aparece con un color gris claro cuando se aplica ya que, las placas están orientadas predominantemente con sus caras paralelas a la superficie de la pieza, y reflejan la luz del ambiente.

Cuando las laminillas tienden a alinearse con un escape del campo, ellas virtualmente se “paran” y dado que sus bordes no reflejan bien la luz, se observan como zonas oscuras. Las concentraciones de la mezcla pueden variarse y así obtenerse más o menos contraste de las indicaciones. Las relaciones de aceite/ laminas normalmente comercializadas es de 6/1 hasta 20/1.

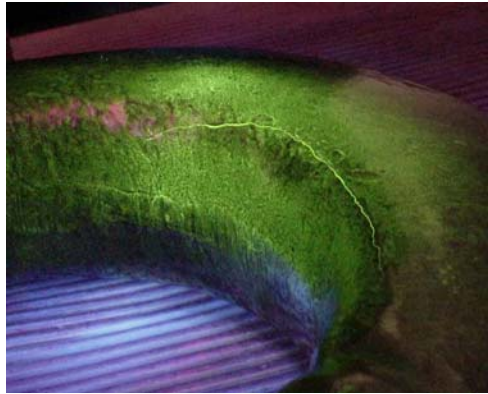
#### **4.7.3.3 Aplicaciones:**

Dado que estas pinturas han sido desarrolladas recientemente, el campo de aplicaciones es limitado. Sin embargo, ensayos de laboratorio han mejorado la capacidad del método y puede ser aplicado en las siguientes áreas:

Inspección de soldaduras en tuberías, tanque, embarcaciones, recipientes a presión y en acero estructurales de construcción en general.

Reparaciones y rutinas de mantenimiento en campo de aviones, camiones, autobuses y equipamiento ferroviario.

Inspecciones de mantenimiento industrial de estructuras, piezas y equipamientos.



**Fig.4-33:** Gancho de grúa. El cual se a sometido a partículas magnéticas específicamente fluorescentes.



**Fig. 4-34:** Eje con cambios de sección ensayado con partículas magnéticas, en el cual se ve claramente grietas.

## **5.0 Análisis por corrientes de Eddy**

---

### **5.1 Introducción**

#### **5.1.1 Definición de las corrientes de Eddy**

Esta basada en los principios de la inducción electromagnética y es utilizada para identificar o diferenciar entre una amplia variedad de condiciones físicas, estructurales y metalúrgicas en partes metálicas ferromagnéticas y no ferromagnéticas, y en partes no metálicas que sean eléctricamente conductoras.

Las corrientes de Eddy son creadas usando la inducción electromagnética, este método no requiere contacto eléctrico directo con la parte que esta siendo inspeccionada.

Las corrientes de Eddy son las corrientes eléctricas inducidas que fluyen en una trayectoria circular. Consiguen su nombre de los “remolinos” que se forman como cuando un líquido o un gas fluye en una trayectoria circular alrededor de algún obstáculos.

#### **5.1.2 Historia de las corrientes de Eddy**

Las corrientes de Eddy empezaron a mencionarse desde 1824 por Dambey Argo y Jean B Foucault; pero su primera aplicación a las pruebas no destructivas data de 1879 con D. E. Hughes, quien las empleó para diferenciar tamaños, formas y composición de diferentes metales y aleaciones. Sin embargo, no fue hasta 1948 cuando el Instituto Reutlingen de Alemania, empezó el desarrollo de la actual instrumentación de corrientes de Eddy.

#### **5.1.3 Aplicaciones de las corrientes de Eddy en pruebas no destructivas**

- ☞ Medir o identificar condiciones o propiedades tales como: conductividad eléctrica, permeabilidad magnética, tamaño de grano, condición de tratamiento térmico, dureza y dimensiones físicas de los materiales.

- ☞ Detectar discontinuidades superficiales y subsuperficiales, como soldaduras, traslapes, grietas, porosidades e inclusiones. Se utilizan sondas de tipo lápiz, tanto en materiales férricos como no férricos.

Con frecuencias de muestreo de 50 KHz a pocos MHz es posible encontrar grietas de un espesor hasta de 0.1 mm.

Las sondas diferenciales son usadas para automatizar el proceso.

En aquellos defectos que son longitudinales y muy largos, se detecta el fallo en los extremos del mismo.

- ☞ Detectar irregularidades en la estructura del material.

- ☞ Medir el espesor de un recubrimiento no conductor sobre un metal conductor, o el espesor de un recubrimiento metálico no magnético sobre un metal magnético.

- ☞ Tipos de materiales no férricos.

Es utilizado para detectar la conductividad del material, el cambio de conductividad es detectado de forma análoga a una grieta.

Usualmente el tipo de metal, dureza, tratamiento térmico se trabaja con frecuencias de 10Hz a 10KHz, para incrementar la profundidad de penetración.

Al ser un método de comparación se requiere conocer perfectamente las características metalúrgicas de la pieza de referencia.

- ☞ Detección de corrosión y grietas sub-superficiales.

Se usa una baja frecuencia, para que penetre lo suficiente en el material.

- ☞ Inspección de tubos de acero.

Nos encontramos con dos dificultades:

- La alta permeabilidad del tubo no permite penetrar con las corrientes de Eddy.
- La variación de la permeabilidad modifica la señal obtenida con las corrientes de Eddy.

Estos problemas son eliminados saturando el material, mediante un fuerte campo magnético AC o DC.

En tubos con soldadura, solo se testea la soldadura.

Cuando se utiliza una unidad de magnetización, se requiere también que se utilice una unidad de desmagnetización, para dejar la pieza tal y como era inicialmente.

☞ Testeo de intercambiadores de calor.

Se utilizan sondas diferenciales de tipo ID, llegando a una precisión del 5% de la delgadez de la pared del tubo.

La frecuencia de muestreo es determinada por el material y espesor, corriendo a pocos KHz o a 600KHz, dependiendo.

Se requiere unidad de magnetización para tubos magnéticos, aunque la precisión que se logra es pequeña.

☞ Detección de grandes defectos.

Se utilizan sistemas rotativos que giran y trasladan la pieza, que se testea. El problema es que es muy sensible a la distancia y desvanecimiento. Existen sistemas para la corrección del desvanecimiento o amortiguación.

Con un sistema rotativo es muy importante conocer la longitud mínima del defecto. Que depende de la velocidad de rotación.

## **5.1.4 Ventajas y limitaciones de las corrientes de Eddy**

### **5.1.4.1 Ventajas.**

☞ Se aplica a todos los metales, electroconductores y aleaciones.

☞ Alta velocidad de prueba.

☞ Medición exacta de la conductividad.

☞ Indicación inmediata.

- ☞ Detección de áreas de discontinuidades muy pequeñas. ( $0.0387\text{mm}^2 \approx 0.00006\text{in}^2$ )
- ☞ La mayoría de los equipos trabajan con baterías y son portátiles.
- ☞ La única unión entre el equipo y el artículo bajo inspección es un campo magnético, no existe posibilidad de dañar la pieza.
- ☞ Inspección rápida, simple y fiable para detectar defectos de superficie o de poca profundidad en materiales conductores.
- ☞ Puede utilizarse para medir la conductividad eléctrica de un material dado.
- ☞ Útil para medir recubrimientos no conductores.
- ☞ Inspección de orificios mediante un escáner de rotación de gran velocidad y de una sonda de superficie.

#### **5.1.4.2 Limitaciones.**

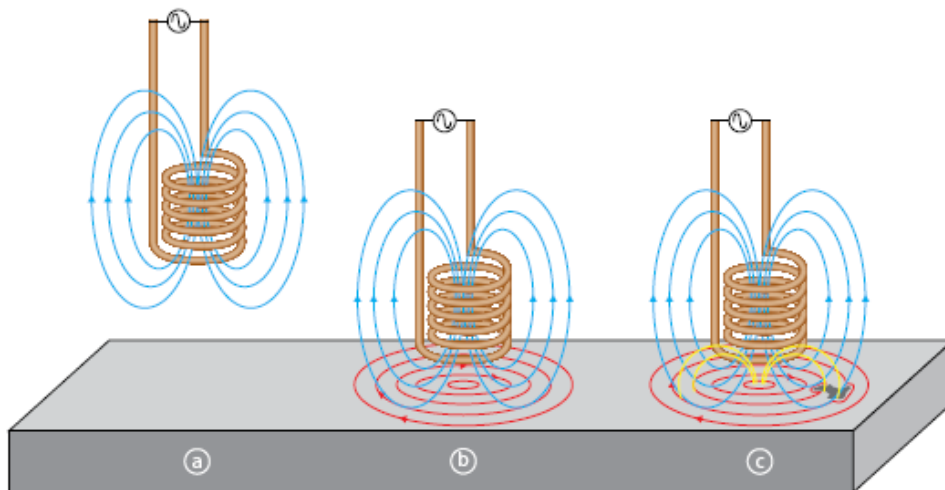
- ☞ La capacidad de penetración esta restringida a menos de 6 mm.
- ☞ En algunos casos es difícil verificar los metales ferromagnéticos.
- ☞ Se aplica a todas las superficies formas uniformes y regulares.
- ☞ Los procedimientos son aplicables únicamente a materiales conductores.
- ☞ No se puede identificar claramente la naturaleza específica de las discontinuidades.
- ☞ Se requiere de personal calificado para realizar la prueba.

## 5.2 Principio de las corrientes de Eddy

El principio de la prueba se basa en el proceso de inducción electromagnética. El cual incluye una bobina de prueba a través de la cual se hace pasar una corriente alterna. El flujo de la corriente variable en una bobina de prueba produce un campo magnético variable alrededor de la bobina, el cual es conocido como campo primario.

Cuando un objeto de prueba eléctricamente conductor es colocado en el campo primario, una corriente eléctrica será inducida en el objeto.

Las corrientes de Eddy son corrientes eléctricas circulantes inducidas por un campo magnético alterno en un conductor aislado (Fig. 5-1). También se le conocen como corrientes parásitas o corrientes de Foucault.



**Fig. 5-1: Sondas utilizadas para efectuar la inspección por corrientes de Eddy.**

El campo producido en la bobina es directamente proporcional a la magnitud de la corriente aplicada, a la frecuencia y a los parámetros de la bobina como:

- a. Inductancia
- b. Diámetro.
- c. Longitud.



- d. Espesor (ancho de la bobina)
- e. Número de vueltas del alambre.
- f. Metal del corazón de la bobina

### **5.2.1 Principios para la generación de corrientes de Eddy**

- ☞ **Conductividad.** La conductividad del material varía de acuerdo a su composición química.
- ☞ **Cambios de temperatura.** Cuando aumenta la temperatura la conductividad disminuye.
- ☞ **Esfuerzos.** En un material debido al trabajo en frío producen distorsión en la estructura. Este proceso mecánico cambia la estructura de grano y la dureza del material, cambiando su conductividad eléctrica.
- ☞ **Dureza.** La conductividad eléctrica disminuye cuando la dureza aumenta.
- ☞ **Permeabilidad.** En cualquier material es la facilidad con la cual se pueden establecer líneas de fuerza magnética. El aire tiene una permeabilidad de 1.

La permeabilidad no es una constante para un material y depende del campo magnético que se genere:

$$\mu = \frac{B}{H}$$

Donde:

$\mu$  = Permeabilidad

B = Flujo magnético (Gauss)

H = Fuerza magnética (Oesterd)

- ☞ **Efecto pelicular.** Es el resultado de la interacción mutua entre las corrientes de Eddy, la frecuencia de operación, la conductividad del objeto de prueba y la permeabilidad.
- ☞ **Efecto de borde.** El campo electromagnético producido por una bobina de prueba excitada se extiende en todas las direcciones desde la bobina. A medida que la

bobina se aproxima a los límites geométricos del objeto de prueba, estos son detectados por la bobina antes de que ésta llegue al límite.

- ☞ **Efecto de extremos.** Este tipo de efecto sigue la misma lógica que el efecto de borde, siendo la señal que se observa cuando la bobina se aproxima al extremo de un producto. Este término es aplicable a la inspección de barras o productos tubulares.
- ☞ **Lift-Off.** El campo electromagnético es más fuerte cerca de la bobina y se disipa conforme se aleja de la misma. El acoplamiento electromagnético entre la bobina y el objeto de prueba es muy importante, este acoplamiento varía cuando existe mucha distancia entre la bobina y el objeto de prueba, es conocida como lift-off.
- ☞ **Factor de llenado.** Es el término utilizado para describir la porción de espacio que también estará electromagnéticamente acoplado con un objeto a la bobina que lo rodea, o en lo que esta insertado. El factor de llenado puede ser descrito como la relación cuadrática entre los diámetros del objeto y la bobina, que es una ecuación de la relación de áreas.

$$\eta = \frac{d^2}{D^2}$$

Donde:

$\eta$  = Factor de llenado.

$d$  = Diámetro de la bobina.

$D$  = Diámetro de la pieza.

- ☞ **Discontinuidades.** Puede ser detectada cualquier discontinuidad que tenga cambios apreciables en el flujo normal de las corrientes de Eddy. Discontinuidades tales como fracturas, picaduras, entalladuras. Daño vibracional y corrosión. Las cuales causan que la conductividad efectiva de un objeto de prueba sea reducido. Las discontinuidades superficiales son más fácilmente detectadas que las subsuperficiales.

☞ **Relación señal-Ruido.** Se considera como ruido cualquier variación que altere o interfiera la respuesta del sistema. Es la relación entre las señales de interés y las no deseadas. Las fuentes más comunes de ruido son las variaciones en la rugosidad de la superficie, la geometría y la homogeneidad. Otros ruidos pueden ser fuentes externas como, máquinas de soldar, motores eléctricos y generadores.

### 5.2.1.1 La inducción mutua en la inspección de fallas por corriente de Eddy.

En la inspección de la corriente de Eddy, las corrientes se generan en el material de la prueba debido a la inducción mutua. La punta de prueba es básicamente una bobina de alambre a través de la cual se pasa la corriente alterna. Por lo tanto, cuando la punta de prueba está conectada con un instrumento del Eddyscope, es representada básicamente por el circuito 1. El segundo circuito puede ser cualquier pedazo de material conductor (Fig. 5-2).

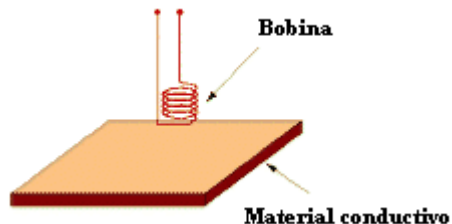


Fig. 5-2: Inductancia entre el circuito 1 (punta de prueba) y el circuito2 (material conductor).

Cuando la corriente alterna se pasa a través de la bobina, un campo magnético se genera al alrededor de la bobina. Cuando la punta de prueba se trae en proximidad a un material conductor, tal como aluminio, el campo magnético que cambia de la punta de prueba genera un flujo en el material. La corriente inducida fluye en lazos cerrados en los planos perpendiculares al flujo magnético. Se nombran **las corrientes de Eddy** porque se asemejan a las corrientes de Eddy o corrientes en remolinos.

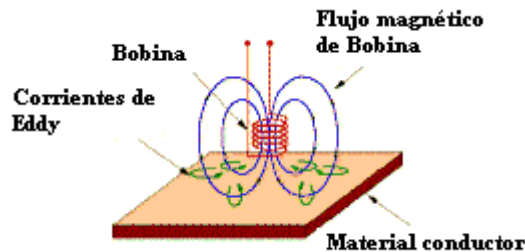


Fig. 5-3: Remolinos producidos por la inductancia denominados corrientes de Eddy.

Las corrientes de Eddy producen sus propios campos magnéticos que interactúan con el campo magnético primario de la bobina. Midiendo cambios en la resistencia y la reactancia inductiva de la bobina, la información se puede recopilar sobre el material de la prueba. Esta información incluye la conductividad eléctrica y la permeabilidad magnética del material, la cantidad de corte del material a través del campo magnético de las bobinas, y la condición del material (es decir si contiene las grietas u otros defectos.) La distancia de la bobina al material conductor se llama lift-off, y esta distancia afecta la inductancia-mutua de los circuitos. Lift-off se puede utilizar para hacer las medidas del grueso de las capas no conductoras, tales como pintura, que llevan a cabo la punta de prueba cierta distancia de la superficie del material conductor.

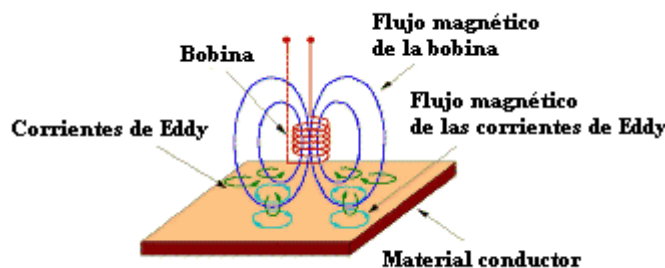


Fig. 5-4: La distancia de la bobina al material conductor se le denomina Lift-off.

## 5.2.2 Profundidad de la penetración y de la densidad de corriente

La profundidad de las corrientes de Eddy que penetran en un material son afectadas por la frecuencia de la excitación actual así como por la conductividad eléctrica y la permeabilidad magnética del material. La profundidad de la penetración disminuye con el aumento de frecuencia, de la permeabilidad magnética y del aumento de la conductividad. La profundidad en la cual la densidad de la corriente de Eddy ha disminuido a  $1/e$ , o cerca

del 37% de la densidad superficial, se llama la profundidad estándar de la penetración ( $d$ ). La palabra “estándar” denota la excitación del campo electromagnético de la onda plana dentro de la muestra de la prueba (las condiciones que se alcanzan raramente en la práctica). Aunque las corrientes de Eddy penetran más aun de la profundidad estándar de la penetración, disminuyen rápidamente con la profundidad. En dos profundidades estándares de la penetración ( $2d$ ), la densidad de la corriente de Eddy a disminuido a  $1/e$  ajustado al 13.5% de la densidad superficial. En tres profundidades ( $3d$ ), la densidad de la corriente de Eddy está abajo al solamente 5% de la densidad superficial.

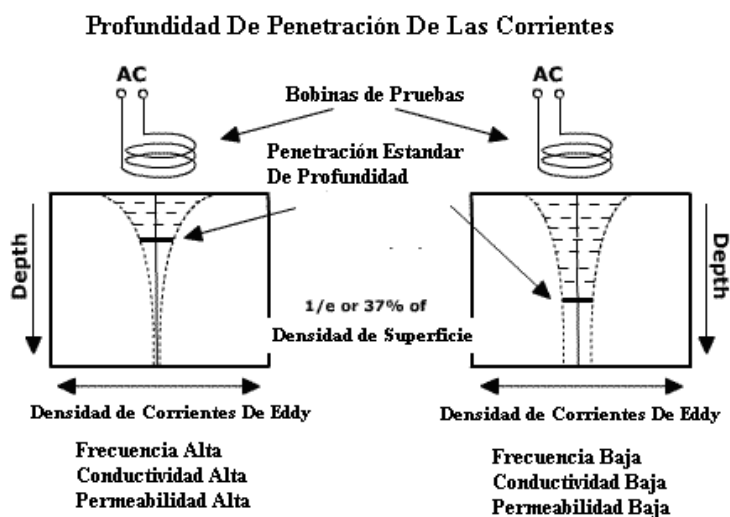


Fig. 5-5: Profundidad de penetración de las corrientes de Eddy.

Puesto que la sensibilidad de una inspección de la corriente de Eddy depende de la densidad de la corriente de Eddy en la localización del defecto, es importante saber la fuerza de las corrientes de Eddy en esta localización. Al procurar localizar defectos, una frecuencia se selecciona a menudo por la profundidad prevista del defecto dentro de una profundidad estándar de la penetración. Esto ayuda a asegurar que la fuerza de las corrientes de Eddy será suficiente para producir una indicación del defecto. Alternativamente, al usar corrientes de Eddy para medir la conductividad eléctrica de un material, la frecuencia se fija a menudo de modo que produzca tres profundidades estándares de penetración dentro del material. Esto ayuda a asegurar que las corrientes de Eddy serán tan débiles en el lado trasero del material que los cambios en el grueso material no afectarán las medidas de la corriente de Eddy.

### **5.2.3 Retraso de la fase**

El retraso de la fase es un parámetro de la señal de la corriente de Eddy que nos permitir obtener la información sobre la profundidad de un defecto dentro de un material. El retraso de la fase es el cambio en tiempo entre la respuesta de la corriente de Eddy en una interrupción en la superficie y de una interrupción en cierta distancia debajo de la superficie. La generación de las corrientes de Eddy puede ser pensada como proceso dependiente del tiempo. Las interrupciones en las corrientes de Eddy lejos de la superficie producirán más retraso de la fase que interrupciones cerca de la superficie. El voltaje y la corriente de la señal tendrán este desplazamiento de fase o retraso con la profundidad. (Con el ángulo de la fase, la corriente cambia de puesto con respecto al voltaje.)

El retraso de la fase es un parámetro importante en la prueba de corriente de Eddy; porque permite estimar la profundidad de un defecto y, determina el tamaño superficial de un defecto. La señal producida por un defecto depende de la amplitud y la fase de las corrientes que son interrumpidas. Un defecto superficial pequeño y el defecto interno grande pueden tener un efecto similar en la magnitud de la impedancia en una bobina de prueba. Sin embargo, debido al retraso de la fase con la profundidad, habrá una diferencia característica en el vector de la impedancia de la bobina de prueba.

## **5.3 Principios básicos de los instrumentos**

### **5.3.1 Instrumentos de la corriente de Eddy**

Los equipos de corriente de Eddy se pueden adquirir en una variedad de configuraciones (Fig. 5-6). Existen instrumentos análogos y digitales. Los instrumentos son clasificados comúnmente por el tipo de exhibición usada para presentar los datos. Los tipos comunes son medidores análogos, lectura digital, plano de impedancia y tiempo contra amplitud de la señal. Algunos instrumentos son capaces de presentar datos en varios tamaños.



Fig.5-6: Instrumentos de la Corriente de Eddy.

El instrumento de prueba más básico de la corriente de Eddy consiste en una fuente de corriente alterna, una bobina de alambre conectada con esta fuente, y un voltímetro para medir el cambio del voltaje a través de la bobina (Fig. 5-7). Un amperímetro se podía también utilizar para medir el cambio de parámetros en el circuito en vez de usar el voltímetro.

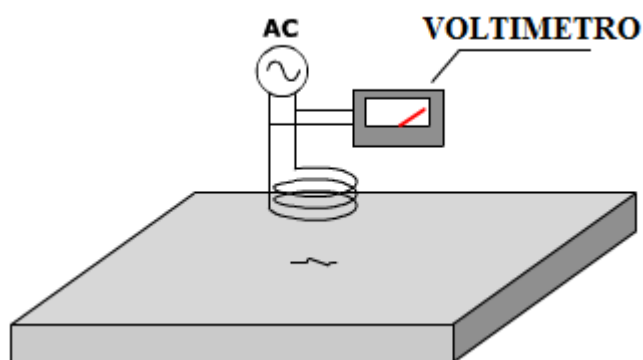


Fig. 5-7: Instrumento básico de las corrientes de Eddy.

### **5.3.2 Circuitos resonantes**

Las puntas de prueba de la corriente de Eddy tienen típicamente una frecuencia o una gama de las frecuencias que se diseñan para el funcionamiento. Cuando la punta de prueba funciona fuera de esta gama, pueden ocurrir problemas con los datos. Cuando una punta de prueba funciona con la frecuencia más alta, ocurre una resonancia en el circuito. En un circuito paralelo con la resistencia ( $r$ ), inductancia ( $XL$ ) y capacitancia ( $XC$ ), como los aumentos de la frecuencia  $XL$  disminuciones y  $XC$  aumenta. La resonancia ocurre cuando  $XL$  y  $XC$  son iguales pero de signo contrario. En la frecuencia resonante, la impedancia total del circuito parece venir solamente de los efectos de resistencia puesto que  $XL$  y  $XC$  se cancelan. Cada circuito que contiene capacitancia e inductancia tiene una frecuencia

resonante que es inversamente proporcional a la raíz cuadrada del producto de la capacitancia y de la inductancia.

$$f_{\text{Resonancia}} = \frac{1}{2\pi \times \sqrt{L \times C}}$$

En las sondas y los cables del medidor de las corrientes de Eddy, se indica comúnmente que la capacitancia es insignificante. Sin embargo, incluso los circuitos que no contienen componentes discretos para resistencia, capacitancia, e inductancia pueden todavía sufrir sus efectos. Cuando dos conductores se colocan lado a lado, siempre hay cierta capacitancia entre ellos. Así, cuando se usan muchas vueltas del alambre para formar una bobina, presenta cierta cantidad de capacitancia parásita. Se presenta además, el cable que interconecta componentes de equipo electrónico o el equipo a las puntas de prueba, tiene a menudo cierta capacitancia, así como, inductancia. Esta capacitancia es muy pequeña y en la mayoría de los casos no tiene ningún efecto significativo. Sin embargo, no son insignificantes en circuitos sensibles y en los de alta frecuencia donde llegan a ser importantes.

### **5.3.3 Plano complejo de la impedancia (alcance del remolino)**

El diagrama del plano de la impedancia es una manera muy útil de exhibir datos de la corriente de Eddy (Fig. 5-8). Según lo mostrado en la figura abajo, la fuerza de las corrientes de Eddy y la permeabilidad magnética causada por el material de prueba, que la corriente de Eddy señala en el plano de la impedancia, para reaccionar en una variedad de maneras.



### Plano De Respuestas De Las Impedancias De Las Corrientes De Eddy

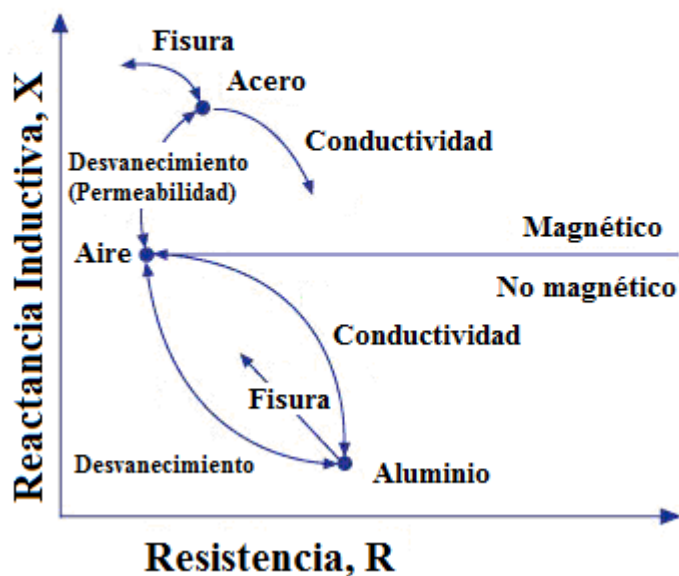


Fig. 5-8: Plano de respuestas de la impedancia de las corrientes de Eddy.

Si el circuito de la corriente de Eddy se establece en aire y después se pone un pedazo de aluminio, el componente de la resistencia aumentará (las corrientes de Eddy se están generando en el aluminio y ésta toma energía fuera de la bobina, es la parte que se muestra hacia arriba como resistencia) y la reactancia inductiva de la bobina disminuye (el campo magnético creado por las corrientes de Eddy se opone el campo magnético de la bobina y el efecto neto es un campo magnético más débil para producir inductancia). Si una grieta está presente en el material, pocas corrientes de Eddy podrán formarse. Los cambios de conductividad causarán que la señal de las corrientes de Eddy cambie de diversa manera.

Cuando una punta de prueba se pone en un material magnético tal como acero, algo diferente sucede. En el aluminio (conductor pero no magnético) las corrientes de Eddy apenas se logran formar, manifestándose como aumento en la resistencia de las bobinas. Y, apenas en el aluminio, las corrientes de Eddy generan su propio campo magnético que se opone al campo magnético de las bobinas. Sin embargo, para el diagrama que la reactancia aumenta. Esto es porque la permeabilidad magnética del acero concentra el campo magnético de la bobina. Este aumento en la fuerza del campo magnético eclipsa totalmente

el campo magnético de las corrientes de Eddy. La presencia de una grieta o un cambio en la conductividad producirá un cambio en la señal de la corriente de Eddy similar a lo considerado con aluminio.

### **5.3.4 Medidor análogo**

Los instrumentos análogos son los más simples de los instrumentos disponibles para las inspecciones de la corriente de Eddy (Fig. 5-9). Se utilizan para la detección de grieta, la inspección de la corrosión, o la prueba de la conductividad. Estos tipos de instrumentos contienen un circuito de puente simple.



**Fig. 5-9: Instrumento Análogo de las corrientes de Eddy.**

Los medidores análogos tales como el diseño de D'Arsonval, deben “rectificar” la CA convirtiéndola en CC. Esto se logra lo más fácilmente posible con el uso de diodos. Sin entrar en detalle de cómo y porqué los diodos funcionan como lo hacen, hay que recordar que ellos actúan como una válvula unidireccional para que los electrones fluyan. Actúan como un conductor para una polaridad y aislador para otra. Arreglado en un puente, cuatro diodos servirán para dirigir la CA a través del movimiento del medidor en una dirección constante.

### **5.3.5 Puntas de prueba (modo de operación)**

Las puntas de prueba de la corriente de Eddy están disponibles en una variedad grande de formas y de tamaños (Fig. 5-10). De hecho, una de las ventajas principales de la inspección de la corriente de Eddy es que las puntas de prueba pueden ser diseñadas para una variedad amplia de usos. Las puntas de prueba de la corriente de Eddy son clasificadas por la configuración y el modo de operación de la prueba. La configuración de la punta de prueba se refiere generalmente a la manera en que la bobina o las bobinas se empaquetan “para juntarse lo mejor posible” al campo de interés de la prueba. Un ejemplo de diversas configuraciones de puntas de prueba sería las puntas de prueba de la bobina, que se insertan para examinar interiores. El modo de operación se refiere a la manera en que la bobina se ata con alambre de las bobinas de interfaz con el equipo de prueba. El modo de operación de una punta de prueba generalmente se clasifica en cuatro categorías: absoluto, diferencial, reflexión e híbrido. Cada uno de estas clasificaciones será discutida con detalle.



**Fig. 5-10: Puntas de prueba de corrientes de Eddy.**

#### **5.3.5.1 Puntas de prueba absolutas**

Las puntas de prueba absolutas tienen generalmente una sola bobina que se utiliza para generar las corrientes y para detectar cambios en el campo de las mismas. Según lo discutido anteriormente, la CA se pasa a través de la bobina y ésta produce un campo magnético que se amplía al rededor de la bobina. Cuando la punta de prueba se coloca al lado de un material conductor, el campo magnético que cambia genera corrientes de Eddy

dentro del material. La generación de las corrientes toma energía de la bobina y ésta aparece como aumento en la resistencia eléctrica de la bobina. Las corrientes de Eddy generan su propio campo magnético que se opone al campo magnético de la bobina y éste cambia la reactancia inductiva de la bobina. Midiendo el cambio absoluto en la impedancia de la bobina de prueba, se puede ganar mucha información sobre el material.



**Fig. 5-11: Puntas de prueba absolutas.**

Las bobinas absolutas se pueden utilizar para la detección del defecto, las medidas de la conductividad, las medidas del lift-Off y las medidas del espesor. Son extensamente usadas debido a su flexibilidad. Puesto que las puntas de prueba absolutas son sensibles a parámetros tales como conductividad, lift-Off de la permeabilidad y temperatura, se deben tomar las medidas para reducir al mínimo estas variables cuando no son importantes para la inspección que se realiza. Es muy común que las puntas de prueba absolutas comercialmente disponibles tengan una bobina cargada de “aire fijo” como referencia que compense las variaciones ambiente de la temperatura.

### **5.3.5.2 Puntas de prueba diferenciadas**

Las puntas de prueba diferenciales tienen dos bobinas activas generalmente opuestas, aunque podrían ser iguales con resultados similares. Cuando las dos bobinas están sobre un área de flujo-libre en la prueba, no hay señal diferenciada entre las bobinas puesto que ambas examinan el material idénticamente. Sin embargo, cuando una bobina está sobre un

defecto y la otra en un buen material, se produce una señal diferenciada. Tienen las ventajas de ser muy sensibles a los defectos, esto es relativo a las características tales como las variaciones dimensionales o de las temperaturas graduales. Las señales de oscilación de la punta de prueba también se reducen con este tipo de punta de prueba. Hay también desventajas a usar puntas de prueba diferenciales. Los más notablemente posible son, que las señales pueden ser difíciles de interpretar. Por ejemplo, si un defecto es más largo que el espaciamiento entre las dos bobinas, sólo los bordes que conducen serán detectados debido a la cancelación de la señal, cuando ambas bobinas detectan el defecto igualmente.

#### **5.3.5.3 Puntas de prueba de reflexión**

Las puntas de prueba de reflexión tienen dos bobinas similares a una punta de prueba diferencial, pero una bobina se utiliza para excitar las corrientes de Eddy y la otra se utiliza para detectar cambios en el material de prueba. La ventaja de las puntas de prueba de reflexión es que las bobinas del conductor y del recolector se pueden optimizar por separado para su propósito. La bobina del conductor se puede usar para producir un campo fuerte y uniforme del flujo en la vecindad de la bobina de recolección, mientras que la bobina de reflexión se puede hacer muy pequeña de modo que sea sensible a los defectos muy pequeños.

#### **5.3.5.4 Puntas de prueba híbridas**

Un ejemplo de una punta de prueba híbrida es la “D” partida, punta de prueba diferenciada mostrada en la Fig. 5-12. Esta punta de prueba tiene una bobina del conductor que rodea a dos “D” formadas, identificando las bobinas. Funciona de la misma forma que las de reflexión pero además, sus bobinas de detección funcionan en el modo diferenciado. Este tipo de punta de prueba es muy sensible a las grietas superficiales. Otro ejemplo de una punta de prueba híbrida es la que utiliza una bobina convencional para generar corrientes de Eddy en el material pero después utiliza un tipo diverso de sensor para detectar cambios en la superficie y dentro del material de la prueba. Un ejemplo de una punta de prueba híbrida es la que utiliza un sensor del efecto de pasillo para detectar cambios en el flujo magnético

que se escapa de la superficie de prueba. Las puntas de prueba híbridas generalmente se diseñan especialmente para un uso específico de la inspección.

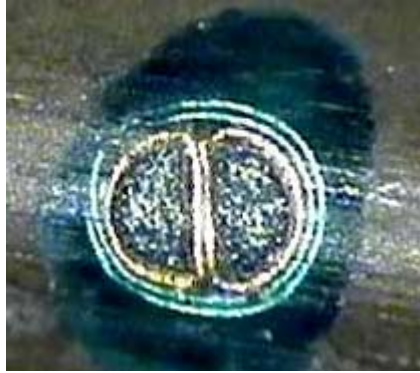


Fig. 5-12: Punta de prueba Híbrida.

### **5.3.6 Puntas de prueba (configuraciones)**

Según lo mencionado anteriormente, las puntas de prueba de corriente de Eddy son clasificadas por la configuración y el modo de operación de la prueba. La configuración de la punta de prueba se refiere generalmente a la manera en que la bobina o las bobinas se empaquetan “para juntarse lo mejor posible” al campo de interés de la prueba. Algunas de las clasificaciones comunes de las puntas de prueba basadas en su configuración incluyen puntas de prueba superficiales, puntas de prueba de agujero de perno, puntas de prueba de diámetro interior (identificación), y el diámetro exterior (OD) de la sonda.

#### **5.3.6.1 Puntas de prueba de superficie**

Si las puntas de prueba de superficie se diseñan para ser portátiles y se piensan generalmente para ser utilizadas en contacto con la superficie de prueba (Fig. 5-13). Las puntas de prueba de la superficie consisten generalmente en una bobina de alambre muy fino encapsulado en una cubierta protectora. El tamaño de la bobina y la forma de la cubierta son determinados para el uso previsto de la punta de prueba. La mayoría de las bobinas se ajustan de modo que el eje de la bobina sea perpendicular a la superficie de prueba.

Esta configuración de bobina se conoce como bobina de la crepe y a veces es buena para detectar las discontinuidades superficiales que se encuentran orientadas perpendicularmente a la superficie de prueba. Las discontinuidades, tales como de laminaciones, que están en un plano paralelo a la superficie de prueba irán probablemente desapareciendo con esta configuración de la bobina.



**Fig. 5-13: Puntas de prueba de la superficie.**

Las bobinas superficiales anchas se utilizan al explorar las áreas grandes en busca de defectos relativamente grandes. Muestran un área relativamente grande y permiten una penetración más profunda. Puesto que muestran un área grande, se utilizan a menudo para las pruebas de conductividad para conseguir más de una medida material a granel. Sin embargo, su capacidad se limita a detectar discontinuidades pequeñas.

Las puntas de prueba del lápiz tienen una bobina superficial pequeña que se encapsula en una cubierta delgada larga para permitir la inspección en espacios restringidos. Se encuentran disponibles con un eje recto o con un eje doblado, que facilita una detección más fácil y colocación en la inspección. Las puntas de prueba de lápiz son propensas a oscilaciones debido a su base pequeña y las fundas se utilizan a veces para proporcionar una base más ancha.

### **5.3.6.2 Puntas de prueba de agujero de perno**

Las puntas de prueba del agujero de perno son un tipo especial de punta de prueba superficial que se diseñó para ser utilizada con un explorador del agujero de perno. Tienen una bobina superficial que se monta dentro de una cubierta que empareja el diámetro del agujero que es examinado. La punta de prueba se inserta en el agujero y el explorador rota la punta de prueba dentro del agujero.

### **5.3.6.3 Puntas de prueba de bobina de diámetro interior**

Las puntas de prueba de Interiores (Fig. 5-14), que también se refieren a la bobina, las sondas o las puntas de prueba a través de la alimentación, se insertan en materiales huecos, tales como tuberías, para examinar el interior. La identificación de las puntas de prueba se basa en una cubierta que la mantiene centrada en el material y la orientación de las bobina(s) constantes en relación a la superficie de la prueba. Las bobinas se acoplan lo más posible alrededor de la circunferencia de la punta de prueba de modo que ésta examine un área alrededor de la circunferencia entera del objeto de la prueba.



**Fig. 5-14: Puntas de prueba de Diámetro Interior.**



#### **5.3.6.4 Bobinas de diámetro exterior (OD)**

Las puntas de prueba de las bobinas OD se llaman a menudo bobinas de diámetro exterior. Son similares a las puntas de prueba de diámetro interior. Las puntas de prueba del OD se utilizan comúnmente para examinar productos sólidos, tales como barras.



Fig. 5-15: Puntas de prueba de exteriores.

#### **5.3.7 Puntas de prueba de blindaje de carga**

Uno de los desafíos de realizar una inspección de la corriente de Eddy está en conseguir la suficiente fuerza del campo de la corriente de Eddy en la región de interés dentro del material. Otro desafío está en mantener el campo ausente de las características no relevantes de la prueba. El cambio de la impedancia causado por las características no relevantes puede complicar la interpretación de la señal. La punta de prueba del tipo de blindaje de carga se utiliza a veces para limitar la extensión y para concentrar el campo magnético de la bobina Fig. 5-16. Por supuesto, si el campo magnético se concentra cerca de la bobina, las corrientes de Eddy también serán concentradas en esta área.

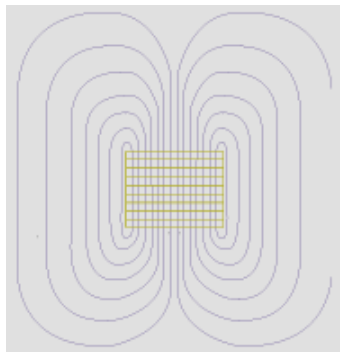


Fig. 5-16: Concentración del campo magnético de la bobina.

### 5.3.7.1 El blindaje de la punta de prueba

El blindaje de la punta de prueba se utiliza para prevenir o para reducir la interacción del campo magnético de la punta de prueba con las características no relevantes en la proximidad de la punta de prueba. El blindaje se podría utilizar para reducir efectos del borde al probar cerca de las transiciones dimensionales tales como un paso o un borde. El blindaje (Fig.5-7) se podría también utilizar para reducir los efectos de sujetadores conductores o magnéticos en la región de la prueba.

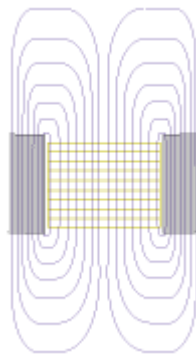


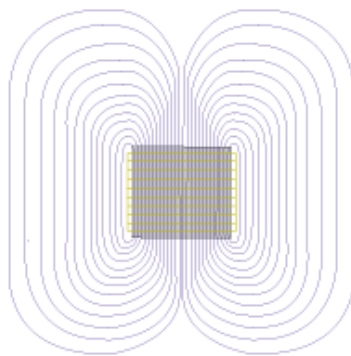
Fig. 5-17: Campo blindado.

Las puntas de prueba de la corriente de Eddy se blindan lo más a menudo posible usando blindajes magnéticos o blindajes de la corriente. Las puntas de prueba magnéticas blindadas tienen su bobina rodeada por un anillo de ferrita o de otro material con alta permeabilidad y conductividad baja. La ferrita crea un área de reluctancia magnética bajo el campo magnético de la punta de prueba. Esto concentra el campo magnético en un área más apretada alrededor de la bobina.

Aplicaciones que blindan la corriente de Eddy; un anillo de materia altamente conductora pero no magnética, generalmente de cobre, que rodea la bobina. La porción del campo magnético de la bobina cortada a través del blindaje generará corrientes de Eddy en el material con características no relevantes afuera del área blindada. Cuanta más alta es la frecuencia de la corriente usada para conducir la punta de prueba, más eficaz será el blindaje debido al efecto de la capa en el material.

### **5.3.7.2 Punta de prueba cargada con núcleo de ferrita**

Las bobinas se ajustan a veces alrededor de una base de ferrita. Puesto que la ferrita es ferromagnética, el flujo magnético producido por la bobina prefiere viajar a través de la ferrita en comparación con el aire. Por lo tanto, la base de la ferrita concentra el campo magnético cerca del centro de la punta de prueba. Esto, alternadamente, concentra las corrientes cerca del centro de la punta de prueba. Las puntas de prueba con núcleo de ferrita tienden a ser más sensibles que las puntas de prueba con base de aire y son menos afectadas por oscilaciones y despegue de la punta de prueba.



**Fig. 5-18: Bobinas con corazón de Ferrita.**

### **5.3.8 Diseño de la bobina (punta de prueba)**

La característica más importante de la prueba de la corriente de Eddy es la manera de la cual las corrientes se inducen y se detectan en el material bajo prueba. Esto depende del diseño de la punta de prueba. Según lo discutido anteriormente, las puntas de prueba pueden contener una o más bobinas, una base y blindaje. Todos tienen un efecto importante en la punta de prueba, pero la bobina requiere la mayor consideración del diseño.

Una bobina consiste en una longitud de alambre sujeto de manera helicoidal alrededor de la longitud de una base. El propósito principal de lo anterior es proporcionar una suficiente rigidez en la bobina para prevenir la distorsión. Formas usadas para las bobinas de diámetros superficiales, toma generalmente la forma de tubos o de anillos hechos de materiales dieléctricos. Las bobinas de diámetro pequeños se ajustan generalmente en forma directa sobre un sólido.

La región interna se llama base, que puede consistir en un material sólido o justamente es el aire. Cuando la base es aire o un material no conductor, la punta de prueba es llamada a menudo una punta de prueba con núcleo de aire. Algunas bobinas se ajustan alrededor de una base de ferrita que concentre el campo magnético de la bobina en un área más pequeña; Estas bobinas son llamadas bobinas “cargadas”.

El alambre usado en una punta de prueba de corriente se hace típicamente de cobre o de otro metal no ferroso para evitar efectos magnéticos de histéresis. La bobina tiene generalmente más de una capa para aumentar el valor de la inductancia para una longitud dada en bobina. Cuanta más alta es la inductancia ( $L$ ) de una bobina, en una frecuencia dada, mayor es la sensibilidad de la prueba de la corriente.

En esencia la corriente a través de la bobina es tan baja como sea posible. Una corriente demasiado alta puede producir:

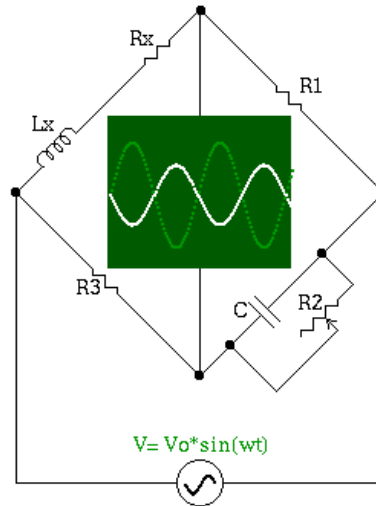
- ☞ una elevación de temperatura, lo cual limita el alcance de la bobina, además de modificar el valor de  $L$ .
- ☞ histéresis magnética, que es pequeña pero perceptible cuando se utiliza una base de ferrita.

### **5.3.9 El equilibrio de la impedancia**

La prueba de la corriente de Eddy requiere determinar los componentes de impedancia de la bobina de detección o de la diferencia de potencial a través de ella. La mayoría de los usos requieren la determinación solamente de cambios en la impedancia, que se puede medir con un alto grado de la sensibilidad usando un puente de la CA. La teoría de operación de instrumentos lo más comúnmente usados, se basa en el puente de inductancia del Maxwell, en el cual los componentes de la impedancia de la bobina de detección, comúnmente llamada una punta de prueba, se comparan con las impedancias variables sabidas conectadas en serie y se forma el brazo de balanceo del puente.

La entrada al puente es un oscilador de CA (Fig. 5-19), a menudo variable en frecuencia y amplitud. El brazo del detector toma la forma de un metro o de un osciloscopio de rayos

catódicos, un detector de fase-sensible, un rectificador para proporcionar una indicación constante, y un atenuador que confina generalmente la indicación de la salida dentro de una gama conveniente. Las instalaciones del almacenaje son necesarias en el osciloscopio para conservar la señal del detector para la referencia durante la exploración con la punta de prueba.



**Fig. 5-19: Puente de corriente alterna.**

La sensibilidad más alta de la detección es alcanzada correctamente cuando las impedancias son equilibradas tanto de las puntas de prueba como las del instrumento que se mide. Así, con un circuito de puente que se balancee inicialmente, una variación subsecuente pero generalmente pequeña en la impedancia de la punta de prueba trastorna el equilibrio, y una diferencia potencial aparece a través del brazo del detector del puente.

Aunque el puente de la inductancia de Maxwell forma la base de la mayoría de los instrumentos de corriente de Eddy, hay varias razones por las que no puede ser utilizada en su forma más simple, incluyendo la creación de capacitancias parasitas, tales como las formadas por las terminales y las conexiones a tierra. Estas impedancias indeseadas pueden ser eliminadas conectando a tierra los dispositivos y adicionando impedancias convenientes para producir uno o más filtros de banda ancha de la frecuencia. Los instrumentos que tienen una gama de frecuencia ancha (es decir a partir 1 kilociclo a 2 megaciclos) pueden poseer alrededor cinco de estas bandas para cubrir dicha gama. El valor de la impedancia de la punta de prueba es por lo tanto una consideración importante en la realización del

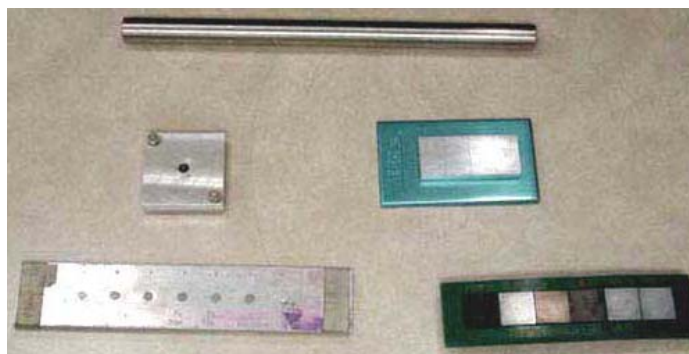
emparejamiento apropiado y, consecuentemente, puede ser necesario cambiar la punta de prueba al cambiar una banda de frecuencia a otra.

## **5.4 Procedimientos**

### **5.4.1 Estándares de referencia**

En la prueba de corrientes de Eddy, el uso de los estándares de referencia (Bloque de calibración, Fig. 5-20) en equipos es particularmente importante puesto que las señales son afectadas por muchas variables y los cambios leves en la disposición del equipo pueden alterar drásticamente el aspecto de una señal. Como con la mayoría de los otros métodos de pruebas no destructivas, se obtiene la información más útil al comparar los resultados de un objeto desconocido con resultados de un objeto similar con las mismas características y defectos. En casi todos los casos, los procedimientos de la inspección de las corrientes requieren que el equipo esté calibrado usando estándares de referencia.

Para la detección de grieta, desgaste de la corrosión y otros daños al material, los estándares de la referencia (o calibración) se utilizan para configurar el equipo de tal manera que produzcan una señal o un sistema de señales con el menor error posible y evitar datos falsos. En muchos casos, el aspecto de una señal de prueba se puede relacionar con el aspecto de una señal de un defecto conociendo el estándar de la referencia y estimar el tamaño de un defecto en el componente de la prueba. Las señales que varían perceptiblemente de las respuestas producidas por los estándares de referencia se deben investigar más a fondo para la determinación de la fuente de esa señal.



**Fig. 5-20: Estándares de calibración o bloques de calibración.**

Los estándares de referencia debe ser del mismo material que el artículo de la prueba. Si esto no es posible, debe ser un material que tenga la misma conductividad eléctrica y permeabilidad magnética y características geométricas similares. Si los estándares de referencia son del tipo que contienen defectos intencionales, estos defectos deben ser tan representativos como los defectos reales en el material de prueba. Cuanta más cerca se está de los estándares de la referencia, más cerca se estará de la prueba real del material. Sin embargo, los daños como las grietas y la corrosión son a menudo difíciles y costosos de producir pero, los defectos artificiales se utilizan comúnmente.

Los estándares comunes de referencia de la corriente de Eddy incluyen:

- ☞ Estándares de la conductividad.
- ☞ Estándares planos de la discontinuidad de la placa.
- ☞ Estándares de adelgazamiento del metal plano de la placa (paso o cuñas afiladas).
- ☞ Estándares de la discontinuidad del tubo.
- ☞ Estándares de metal delgado como tubos.
- ☞ Estándares de la discontinuidad del agujero (con y sin el sujetador).

#### **5.4.2 Filtración de la señal**

La filtración de la señal se utiliza a menudo en la prueba de las corrientes de Eddy para eliminar frecuencias indeseadas de la señal del receptor. Mientras que los ajustes correctos del filtro pueden mejorar perceptiblemente la visibilidad de una señal del defecto, los ajustes incorrectos pueden distorsionar la presentación de la señal e incluso eliminar la señal del defecto totalmente. Por lo tanto, es importante entender el concepto de la filtración de la señal.

La filtración se aplica a la señal recibida y, por lo tanto, no se relaciona directamente con la frecuencia de la impulsión de la punta de prueba. Esto se entiende más fácilmente al representar en una gráfica de tiempo contra la amplitud de la señal. Con este modo de

exhibición, es fácil ver que la forma de la señal es dependiente en el tiempo o que la bobina de la punta de prueba está detectando algo. Por ejemplo, si una punta de prueba superficial se pone en la superficie del conductor y se oscila hacia adelante y hacia atrás, producirá una onda como señal. Cuando la punta de prueba se oscila rápidamente, la señal tendrá una frecuencia más alta que cuando la punta de prueba se oscila lentamente hacia adelante y hacia atrás. La señal no necesariamente presenta un aspecto ondulado puede contener una frecuencia pero, la mayoría de las señales de las corrientes serán compuestas de una gran cantidad de frecuencias. Considere una punta de prueba que detecte una muesca 60 veces por un segundo. En un período de un segundo la punta de prueba podría (en teoría) pasar la muesca 60 veces, dando por resultado la señal de la muesca que tendría una frecuencia de 60 hertz. Pero, impuesta ante esta misma señal, podría estar el resultado de una señal, producto de la oscilación de la punta de prueba, el ruido electrónico, un cambio de la conductividad y otros factores que ocurren en diversas frecuencias.

#### **5.4.2.1 Efectos de los filtros**

Los dos filtros estándares encontrados en la mayoría de los instrumentos se muestran en la Fig.5-21; y son el filtro de paso alto (HPF) y filtro de paso bajo (LPF). Algunos instrumentos también tienen filtro de la banda de paso (BPF), que es un filtro de la combinación del paso alto y bajo. Los filtros se ajustan en Hertz.

El HPF permite que las de altas frecuencias pasen y filtre las frecuencias bajas. El HPF filtra básicamente los cambios que ocurren fuera de la señal en un período del tiempo significativo.

El LPF permite que las frecuencias bajas pasen y filtra las altas frecuencia. Es decir todas las porciones de la señal que cambian rápidamente se filtran, por ejemplo ruido electrónico.



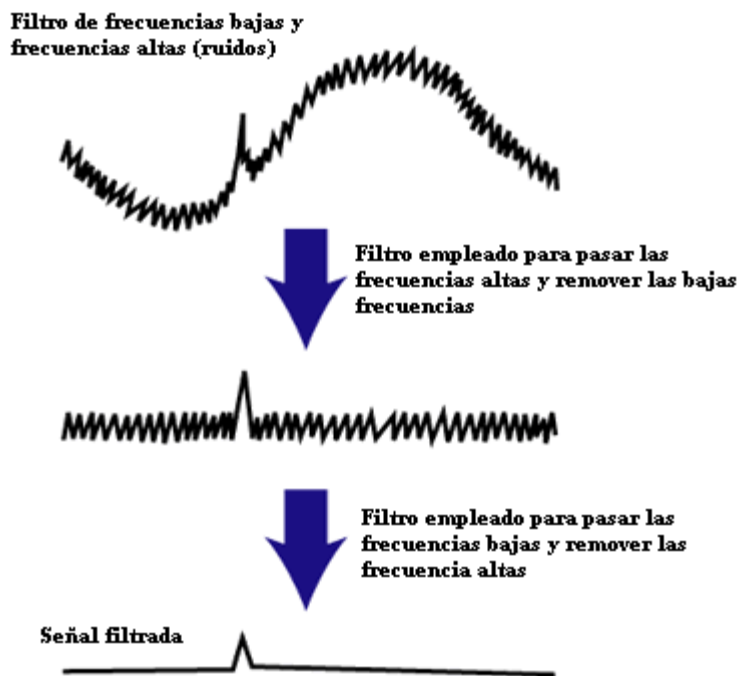


Fig. 5-21: Filtros de señales.

### 5.4.2.2 Ajustes del filtro

Si el espectro de la frecuencia de la señal y la amplitud de la señal o la atenuación se traza, las respuestas del filtro se pueden ilustrar en forma gráfica. La Fig.5-22 muestra la respuesta de un LPF de 20Hz y de un HPF de 40Hz. El LPF permite que solamente las frecuencias en amarillo pasen y los HPF permiten que solamente las frecuencias en el área azul pasen. Por lo tanto, se muestra que con estos ajustes no hay frecuencias que pasan (es decir las frecuencias pasadas por el LPF son filtradas hacia fuera por el HPF y viceversa).

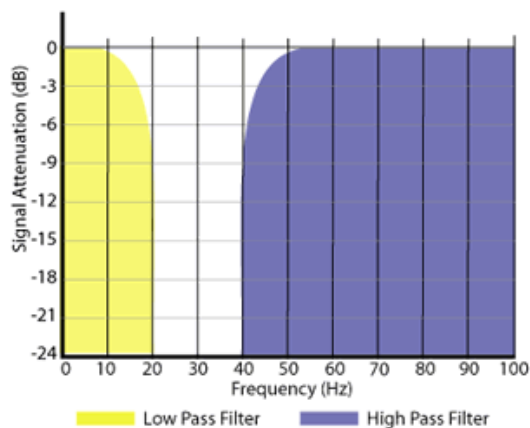


Fig.5-22: Filtros de baja y alta frecuencia.

Para crear una ventana de aceptación para las señales, los filtros necesitan traslaparse. En la Fig.5-23, el LPF se ha ajustado a 60Hz y al HPF a 10Hz. El área demostrada en gris es donde las dos frecuencias se traslapan y se pasa la señal. Una señal de 30Hz conseguirá una amplitud completa, mientras que una señal de 15Hz será atenuada por el aproximadamente 50%. Todas las frecuencias sobre o debajo del área gris (la banda del paso) serán rechazadas por uno de los dos filtros.

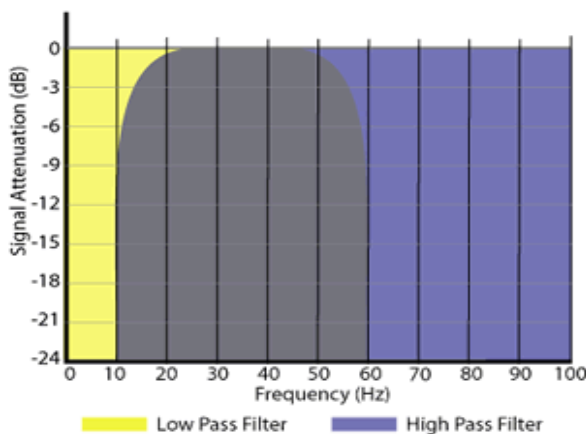


Fig. 5-23: Traslape de filtros LPF y HPF.

### 5.4.2.3 Uso de filtros

La función principal del LPF es quitar ruido de alta frecuencia de interferencia. Este ruido puede venir de una variedad de fuentes incluyendo la instrumentación y/o la punta de prueba misma. El ruido aparece como punto inestable que produce líneas dentadas en la exhibición según lo visto en la señal de una muesca superficial demostrada en la imagen izquierda de la Fig. 5-24. Bajar la frecuencia de LPF quitará más de las frecuencias más altas de la señal y producirá una señal más limpia según lo demostrado en la imagen de centro de la Fig. 5-24. Al usar un LPF, debe ser fijada a la frecuencia más alta que produce una señal usable. Para reducir ruido en superficie o anillo grandes, puede ser necesario utilizar un ajuste muy bajo de LPF (debajo de 10Hz). Cuanto más bajo es el ajuste de LPF, más lenta debe ser la velocidad de exploración y debe ser controlada de más cerca. La imagen a la derecha de la Fig. 5-24 demuestra una señal que ha sido acortada debido a usar una velocidad de exploración demasiado rápida para el ajuste seleccionado del HPF.

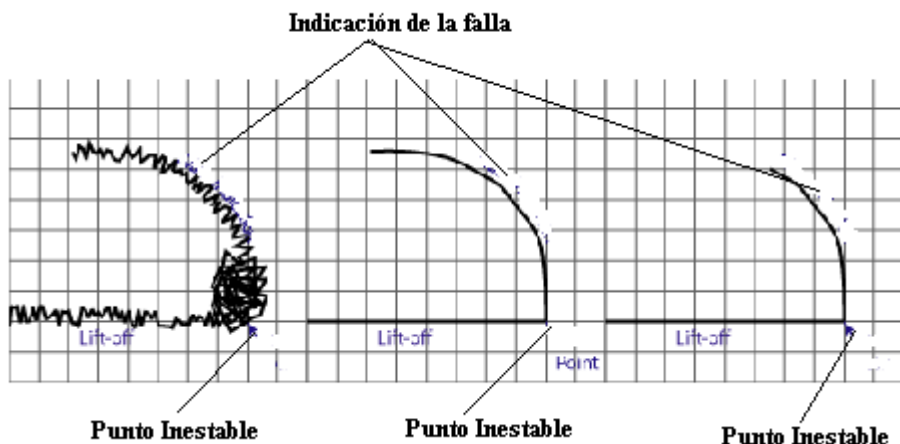


Fig. 5-24: Señales con el uso de filtros.

El HPF se utiliza para eliminar las bajas frecuencias que son producidas por los cambios lentos, tales como cambio de la conductividad a una distancia del material. El HPF es útil al realizar inspecciones automatizadas o semiautomáticas. El uso más común para el HPF es la inspección de agujeros usando un explorador que rota. Mientras que el explorador rota con RPM constante, el HPF se puede ajustar para alcanzar el efecto deseado.

El uso del HPF no se recomienda para la inspección manual, porque guardar una velocidad de inspección constante es difícil, y la señal se deforma y la amplitud disminuye. El tamaño de una señal disminuye mientras que la velocidad de la inspección disminuye y una indicación del defecto puede ser eliminada totalmente si la inspección no se hace con suficiente velocidad. En las imágenes de abajo, puede ser visto como sería una respuesta típica de una muesca superficial en aluminio sin las correcciones del HPF (imagen a la izquierda de la Fig. 5-25) mientras que será diferente cuando se activa el HPF (imagen a la derecha de la Fig. 5-25). Con el HPF, las señales de colocación con una desviación negativa y positiva se producen de una forma similar en el plano de la impedancia.

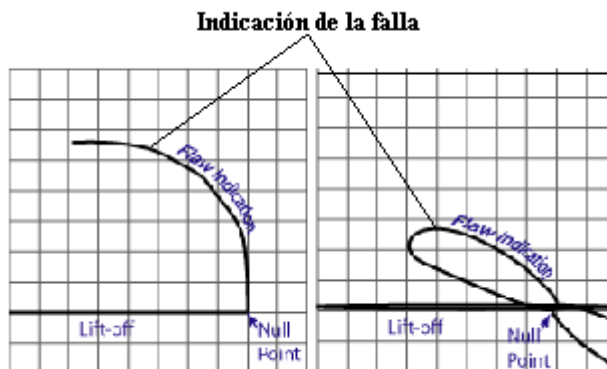


Fig. 5-25: Respuesta típica de una muesca superficial en aluminio.

El uso de un ajuste mínimo de HPF (1 o 2 hertzios) puede ser utilizado manualmente en la inspección, siempre y cuando el operador pueda controlar en gran parte la velocidad de la inspección y llegue a familiarizarse con los cambios de la señal de la indicación mientras que la velocidad de la inspección varía levemente. Un buen ejemplo de tal uso sería la inspección manual del radio de una rueda que se rota a mano, pero la velocidad de la rotación se puede mantener relativamente constante.

## 5.5 Usos

### 5.5.1 Grietas superficiales

El equipo de las corrientes de Eddy se puede utilizar para una variedad de usos tales como la detección de las grietas (discontinuidades), medida del espesor del metal, desgaste del metal debido a la corrosión y a la erosión, determinación del grueso de capa, se puede medir la conductividad eléctrica y la permeabilidad magnética. La inspección de las corrientes es un método excelente para detectar los defectos superficiales (Fig. 5-26).

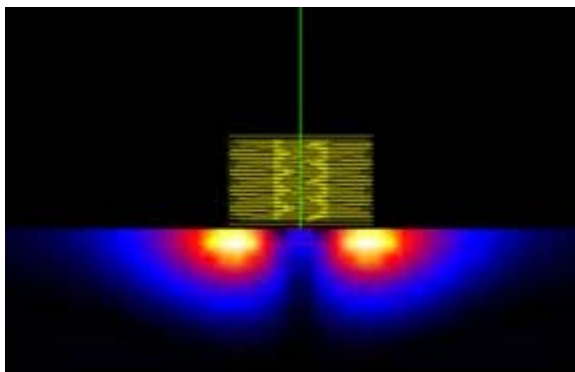
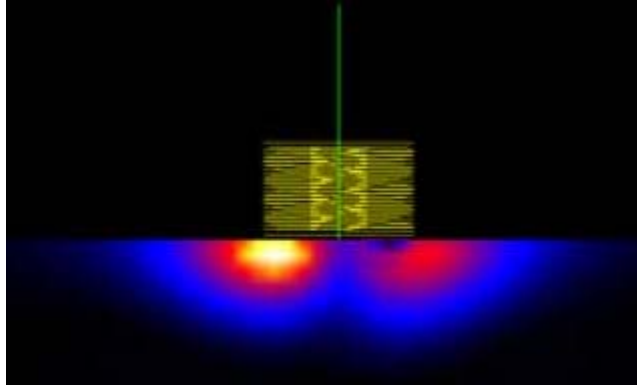


Fig. 5-26: Defectos superficiales.

Los defectos tales como grietas se detectan cuando se interrumpen la trayectoria de las corrientes y debilitan su fuerza. La fuerza de las corrientes debajo de la bobina de la punta de prueba se indica por el color. En la Fig.5-27, se muestra un defecto en la superficie inferior derecha de la bobina y se puede ver que las corrientes son más débiles en esta área.



**Fig. 5-27: Defecto superficial en la bobina.**

Por supuesto, los factores tales como el tipo de material, acabado de la superficie, condición del material, el diseño de la punta de prueba, y muchos otros factores pueden afectar la sensibilidad de la inspección. La detección acertada de las fracturas de la superficie y de las grietas superficiales requiere:

1. Un conocimiento del tipo, de la posición, y de la probable orientación del defecto.
2. Selección de la punta de prueba apropiada. La punta de prueba debe caber dentro de la geometría de la pieza y la bobina debe producir las corrientes que serán interrumpidas por el defecto.
3. Selección de una frecuencia razonable de la impulsión de la punta de prueba. Para los defectos superficiales, la frecuencia debe ser tan alta como sea posible para la resolución máxima y la alta sensibilidad. Para los defectos subsuperficiales, las frecuencias más bajas son necesarias conseguir la profundidad requerida de la penetración y ésta da como resultado menos sensibilidad. Los materiales ferromagnéticos o altamente conductores requieren el uso de una frecuencia más baja hasta llegar a un cierto nivel de la penetración.

4. Disponer de muestras de referencia (bloque de calibración) del material similar al componente que se examinará y que contenga las características y defectos necesarios para igualar lo mejor posible las condiciones de examinación.

Los pasos básicos en la ejecución de una inspección con una punta de prueba superficial son los siguientes:

1. Seleccione y configuración del instrumento y la prueba.
2. Seleccionar una frecuencia para producir la profundidad deseada de la penetración.
3. Ajuste el instrumento (Fig. 5-28) para obtener una respuesta fácilmente reconocible del defecto usando una muestra estándar (bloques de calibración).
4. Ponga la punta de prueba (bobina) en la superficie del componente.
5. inspecciones con la punta de prueba sobre la parte de la superficie con un patrón que proporcione la cobertura completa del área que es examinada. Se debe tener el cuidado necesario para mantener la misma orientación de la punta de prueba porque el bamboleo puede afectar la interpretación de la señal. En algunos casos, los accesorios ayudan a mantener la orientación, los examinadores automatizados pueden ser de gran ayuda.
6. Supervise la señal para un cambio local en la impedancia que ocurrirá cuando la punta de prueba se mueve sobre una discontinuidad.



Fig. 5-28: Ajuste del instrumento.

### **5.5.2 Detección de grieta superficial usando el barrido de las puntas de prueba**

Muchos aviones comerciales utilizan sujetadores diversos para sostener las múltiples capas. Debido a la tensión de la fatiga en estas capas, se producen grietas en las cercanías de los agujeros de los pernos. Para examinar los agujeros de los pernos en una cantidad de tiempo adecuada, se utiliza el barrido de las puntas de prueba el cual es un método eficiente en la inspección.

Se le llama barrido de las puntas de prueba porque se mueven sobre los sujetadores con un movimiento de barrido. Hay dos tipos de barrido de las puntas de prueba, fijas y ajustables, que funcionan generalmente como la reflexión. Esto significa que las corrientes son inducidas por la bobina del conductor y detectadas por una bobina de recepción separada.

El barrido de las puntas de prueba es uno de los métodos más rápidos para examinar una gran cantidad de agujeros. Son capaces de detectar las discontinuidades superficiales y subsuperficiales, pero pueden detectar solamente defectos en una dirección. Las puntas de prueba están marcadas con una línea de detección para indicar la dirección de la inspección. Para hacer una inspección completa del área se deben hacer dos inspecciones que son ortogonales (90 grados) el uno al otro.

### **5.5.2.1 Tipos de punta de prueba**

#### **a) Puntas de prueba con resbalamiento fijo**

Estas puntas de prueba se utilizan generalmente para un material más fino comparado a las puntas de prueba ajustables. La penetración máxima es cerca de 1/8 pulgada. Las puntas fijas de resbalamiento son particularmente apropiadas para encontrar fallas longitudinales en la superficie o las grietas subsuperficiales tales como las encontradas en empalmes.

La gama de frecuencia típica va desde 100 Hz a 100 kHz.

#### **b) Puntas de prueba con resbalamiento ajustable**

Estas puntas de prueba (Fig. 5-30) son apropiadas para encontrar las grietas subsuperficiales en estructuras de múltiples capas o laminas gruesas.

La penetración máxima es cerca de 3/4 pulgada. La gama de frecuencia para las puntas de prueba con resbalamientos ajustables es a partir 100 Hz a 40 kHz.

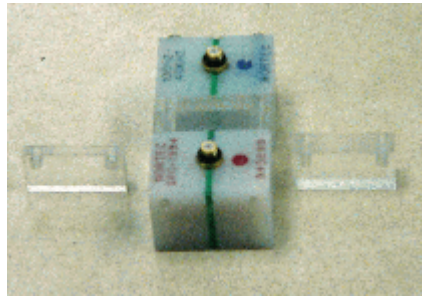


**Fig. 5-29: puntas de prueba con resbalamiento fijo.**

Las puntas de prueba ajustables, como el nombre implican, son ajustables con el uso de los espaciadores, que cambiarán las capacidades de la penetración. El grueso del espaciador entre las bobinas se ajusta normalmente según la mejor detección. Para las exploraciones tangenciales o la exploración de 90 grados con una compensación del centro se utiliza a menudo un espaciador más fino.



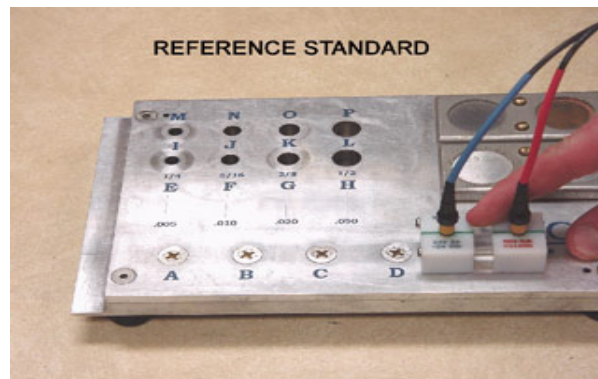
La gama del grueso del espaciador puede variar a partir de 0 (ningún espaciador) para las inspecciones cerca de la superficie y de las cabezas pequeñas del sujetador a un máximo de cerca de 0.3 pulgadas para la penetración profunda con cabezas grandes en los tipos más grandes de la punta de prueba. Un espaciador más ancho dará más tolerancia a la desviación de la punta de prueba. Resbalando las puntas de prueba penetran generalmente materiales más gruesos comparados a las puntas de prueba del anillo de espuma.



**Fig. 5-30: Puntas de prueba con resbalamiento ajustable.**

### **5.5.2.2 Estándares de referencia (bloque de calibración)**

Los estándares de referencia/calibración para las puntas de prueba con resbalamiento consisten típicamente en tres o cuatro placas de aluminio (Fig. 5-31) que se sujeten juntas dentro de un tipo de configuración de empalme. Las muescas de EDM o las grietas inducidas naturales/artificiales se localizan en la segunda o tercera capa de estándar.



**Fig. 5-31: Placas estándares de referencia.**

Los estándares de la referencia usados deben ser manufacturados del mismo tipo de material, aleación, grueso material, y composición química que será encontrada en el componente que se examinará. Los tamaños y las tolerancias de los defectos introducidos en los estándares son regulados generalmente por especificaciones de la inspección.

### **5.5.2.3 Variables de la inspección**

#### **a) Ajuste de la señal de Lift-Off**

Lift-Off se ajusta normalmente para ser relativamente horizontal. El término “relativamente horizontal” se utiliza aquí porque aparece la señal del Lift-Off a menudo una línea curvada más bien que una línea recta. A veces el Lift-Off puede ser una curva aguda y puede necesitar ser ajustado para funcionar levemente hacia arriba antes de mover hacia abajo. Véase la Fig. 5-32.

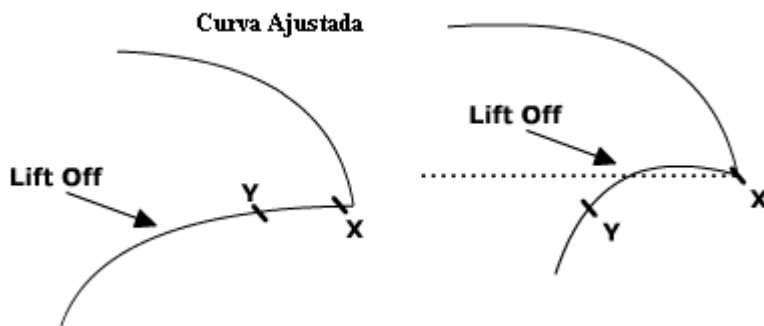


Fig. 5-32: Ajuste de la señal.

#### **b) Exploración de los patrones**

Una exploración típica se centraliza sobre la cabeza del sujetador y se mueve a lo largo del eje de los agujeros del sujetador. Esta exploración se utiliza generalmente para detectar las grietas colocadas a lo largo del eje de los agujeros del sujetador; así como para detectar grietas transversales localizadas a 90 grados del eje de los agujeros del sujetador.

### c) Interpretación de la señal

Cuando la punta de prueba se mueve sobre un agujero del sujetador con una grieta, la indicación cambia y creará típicamente un movimiento vertical más grande. La amplitud vertical del lazo depende de la longitud de la grieta, con grietas más largas dando indicaciones más altas.

Si la grieta está en el lado lejano del sujetador, pues la punta de prueba se mueve sobre ella, el punto seguirá la línea del sujetador primero pero se moverá hacia arriba (a la derecha) donde pasa la grieta. Si la grieta está en el lado cercano, será encontrada primero y el punto se moverá a lo largo del nivel de la grieta antes de pasar abajo del nivel del sujetador.

Si dos grietas en los lados opuestos del agujero del sujetador están presentes, el punto se moverá hacia arriba a la altura por la primera longitud de la grieta y después se volverá al punto de la línea y del balance del sujetador. Si la segunda grieta es más larga que primera, el punto se moverá más alto y terminará el lazo (a la derecha) antes de ir abajo al punto del balance. Véase la Fig. 5-33.

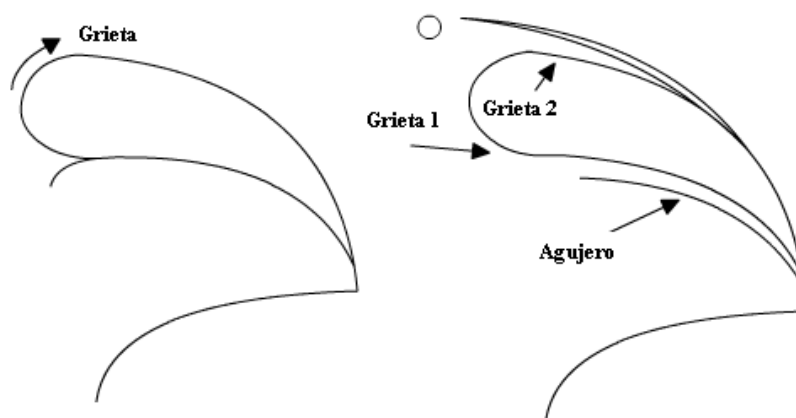


Fig. 5-33: Punto de balance entre dos grietas.

**d) Prueba de análisis de la desviación.**

La mayoría de las puntas de prueba se diseñan para dar una indicación estrecha para un agujero de un sujetador de modo que los lazos de las grietas sean más sensibles. Algunas puntas de prueba con estructuras similares dan indicaciones más amplias y resultados similares. Es importante mantener la punta de prueba centralizada sobre las cabezas del sujetador. Hacer esto dará una indicación más efectiva en el sujetador y en la grieta.

Si la punta de prueba se desvía de la línea de centro, la indicación de la grieta se moverá a lo largo del lazo imagen a la izquierda de la Fig. 5-34 y la cual está presente en la imagen derecha de la Fig. 5-34. La indicación de la grieta está en “a” cuando se centraliza la punta de prueba y los movimientos hacia “b” cuando se desvía en una dirección, o “c” mientras que se desvía en la dirección opuesta. El punto “b” da una indicación importante incluso si pierde una cantidad pequeña de amplitud que ha ganado en fase, dando un ángulo mejor de la separación. Esto es porque nos desviamos al lado donde se localiza la grieta.

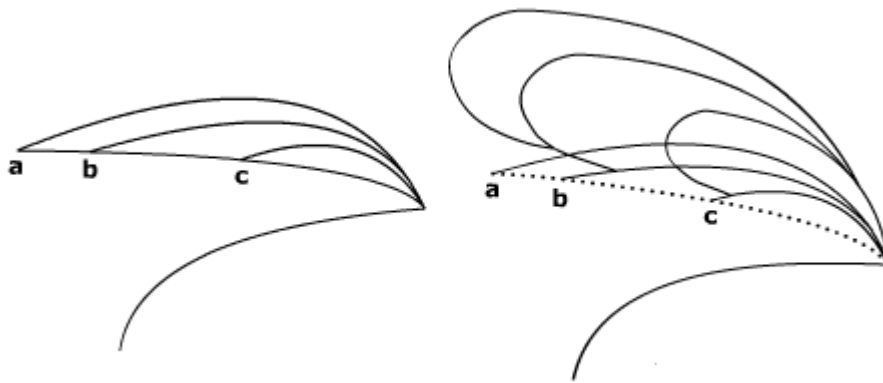


Fig. 5-34: Prueba de análisis de la desviación.

**e) Desviación del ángulo de la grieta**

Una distorsión en la indicación de la grieta ocurre cuando la grieta está en ángulo a la dirección de análisis de la punta de prueba. Esto sucede si la grieta no está totalmente a 90 grados en la inspección de la punta de prueba o en la dirección normal de los cambios

mientras que crece la grieta. Las puntas de prueba de resbalamiento fijo y ajustable son capaces de detectar las grietas hasta cerca de 30 grados de ángulo. Véase la Fig. 5-35.

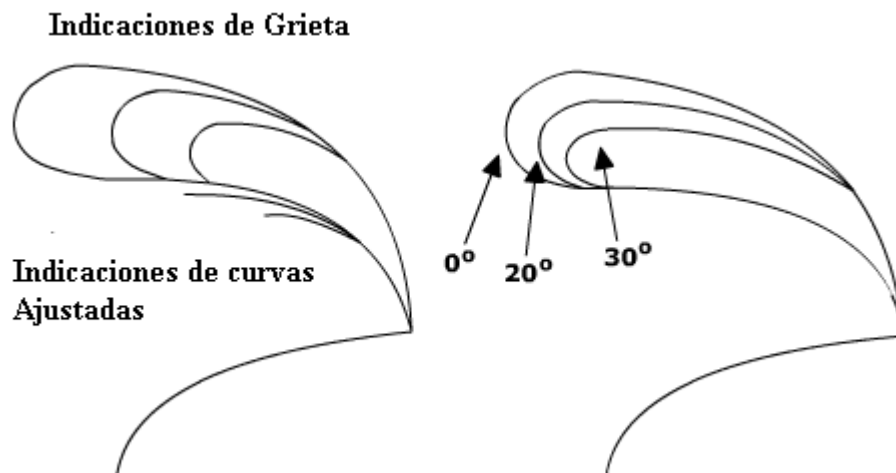


Fig. 5-35: Detección de grietas de hasta 30° de ángulo.

### 5.5.3 Inspecciones de tubos

La inspección de la corriente de Eddy se utiliza a menudo para detectar los cambios de la corrosión, de la erosión, grietas, etc. en tubos (Fig. 5-36). Los intercambiadores de calor y los generadores del vapor, que se utilizan en centrales eléctricas, tienen millares de tubos que se deben prevenir de agrietamiento. Es especialmente importante en plantas de energía atómica evitar, que las aguas contaminadas se mezclen con el agua dulce que será devuelta al ambiente. El agua contaminada fluye en un lado del tubo (interior o exterior) y el agua dulce fluye en el otro lado. El calor se transfiere del agua contaminada al agua dulce y el agua dulce entonces se devuelve a la fuente original, que es generalmente un lago o un río. Es muy importante evitar que las dos fuentes de agua se mezclen, así que las centrales eléctricas son periódicamente paradas para así los tubos y el otro equipo pueden ser examinados y ser reparados. El método de la prueba de la corriente de Eddy y el método relacionado con la prueba en el terreno proporcionan las técnicas de alta velocidad de la inspección para estos usos.

#### **5.5.4 Medidas de conductividad**

Una de las aplicaciones de los instrumentos de la corriente es la medida de la conductividad eléctrica. El valor de la conductividad eléctrica de un metal depende de varios factores, tales como su composición química el estado de la tensión y su estructura cristalina. Por lo tanto, la información de la conductividad eléctrica se puede utilizar para clasificar los metales, comprobar para saber si el tratamiento térmico es el apropiado, y examinarlos para el daño por calor.

La técnica implica generalmente colocar la punta de prueba absolutamente en aire y luego registrar el dato en el aparato, después colocar la punta de prueba en contacto con la superficie de la muestra y de nuevo registrar el dato por medio de un botón de registro del aparato. Para los materiales no magnéticos, el cambio en la impedancia de la bobina se puede correlacionar directamente a la conductividad del material. La técnica se puede utilizar para clasificar fácilmente los materiales magnéticos de los materiales no magnéticos, pero es difícil separar los efectos de la conductividad de los efectos magnéticos de la permeabilidad, así que las medidas de la conductividad se limitan a los materiales no magnéticos. Es importante controlar los factores que pueden afectar los resultados tales como la temperatura de inspección y la geometría de la pieza. Los cambios de la conductividad con temperaturas medidas con esta técnica se deben realizar en una temperatura constante y hacer los ajustes para las variaciones de la temperatura cuando son necesarios. El grueso de la muestra debe generalmente ser mayor de tres profundidades estándares de la penetración. Esto debe ser de tal forma que las corrientes en la superficie trasera de la muestra sean más débiles que en el grueso de la muestra, de lo contrario no se consideran en las medidas.

El tipo generalmente grande de bobina achatada, en las puntas de prueba superficiales se utiliza para conseguir un valor para un área relativamente grande de la muestra. El instrumento generalmente se coloca tal que un material ferromagnético produce una respuesta casi vertical. Entonces, todos los materiales conductores pero no magnéticos producirán una gráfica con tendencia más baja mientras (Fig. 5-37) la punta de prueba se mueve hacia la superficie.

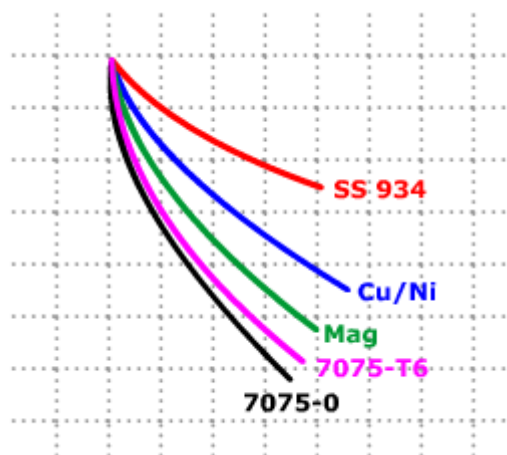


Fig. 5-36: inspección de corrientes de Eddy para detectar cambios en tubos de intercambiadores de calor.

Cuando la punta de prueba se trae cerca de un material conductor pero no magnético, la reactancia inductiva de la bobina es más baja puesto que el campo magnético de las corrientes se opone al campo magnético de la bobina. La resistencia en la bobina aumenta puesto que toma algo de la energía de la bobina para generar las corrientes y ésta aparece como resistencia adicional en el circuito. Pues si la conductividad de los materiales aumenta, las pérdidas de la resistencia será menos y los cambios inductivos de la reactancia serán mayores. Por lo tanto, las señales serán más verticales debido a los aumentos en la conductividad, según se muestra en la imagen de arriba.

Para clasificar los materiales que usan un plano de impedancia en el dispositivo, la señal de la muestra desconocida debe ser comparada con la originada por los estándares de referencia. Sin embargo, existen dispositivos que se pueden calibrar para producir un valor de conductividad eléctrica que se puede comparar a los valores publicados de conductividad eléctrica en MS/m o porcentajes IACS (estándar de cobre recocido internacional). Es importante saber que la conductividad de un material particular puede variar perceptiblemente con variaciones leves en la composición química y, así, una gama de conductividades debe ser considerada generalmente para un material. La gama de la conductividad para un material puede traslaparse con la gama de un segundo material de interés, así que la conductividad no siempre se puede utilizar para clasificar los materiales. Los valores de conductividad eléctrica para una variedad de materiales se pueden encontrar en las tablas de características de materiales de referencia.

### **5.5.5 Medidas de conductividad para la verificación del tratamiento térmico**

Con algunos materiales, tales como aleaciones de aluminio tratados térmicamente, a menudo se hacen medidas de la conductividad para verificar que las piezas y los materiales han recibido el tratamiento térmico apropiado. El aluminio puro es suave y dúctil, y gana fuerza y dureza con la adición de los elementos de aleación. Algunas aleaciones de aluminio son las series 2000 (2014, 2024, etc.), series 6000 (6061, 6063, etc.), y series 7000 (7050, 7075, etc.). Las aleaciones de aluminio de la serie 2xxx tienen cobre, las series 6xxx tienen magnesio, y el 7xxx tiene zinc como sus elementos de aleación importantes.



Fig. 5-37: Medidores de conductividad, digitales y análogos.

El tratamiento térmico de las aleaciones de aluminio se logra en dos fases - tratamiento térmico de la solución y después el envejecimiento. En el paso del tratamiento térmico de la solución, las aleaciones se calientan a una temperatura elevada para disolver los elementos de aleación en la solución. El metal entonces se enfría o se apaga rápidamente “para congelar” los átomos de los elementos de aleación en la estructura del enrejado del aluminio. Esto torsiona y tensiona la estructura, haciendo el movimiento del electrón más difícil, disminuyendo la conductividad eléctrica. En esta condición, las aleaciones siguen siendo relativamente suaves al comienzo pero; ganan dureza cuando los elementos de aleación comienza a precipitarse fuera de la solución, para formar las partículas extremadamente pequeñas que impiden el movimiento de dislocaciones dentro del material. La formación de los precipitados puede ser controlada para muchas aleaciones calentando y



conservando el material a una temperatura elevada por un período de tiempo (envejecimiento artificial). Cuando el precipitado de los elementos de aleación se da fuera de la solución sólida, la conductividad del material aumenta gradualmente. Controlando la cantidad de partículas precipitadas dentro del aluminio, las características se pueden controlar para producir dureza máxima o algunas combinaciones de resistencia a esfuerzos y a la corrosión. A veces, el material debe ser recocido para suavizar sus propiedades. El recocido permite que todos los elementos de aleación se precipiten fuera de la solución para formar un precipitado grueso, extensamente espaciado. La conductividad eléctrica es mayor cuando el material está en la condición recocida.

Puesto que los materiales sometidos a tratamientos térmicos y envejecidos son más fuertes, los componentes se pueden hacer usando menos materiales. Una armadura con un diseño más compacto es a menudo de gran importancia para el diseñador y justifica el costo del proceso del tratamiento térmico.

La selección de las características extensibles y conductividades eléctricas para varias condiciones del tratamiento térmico se presentan en la tabla 5-1.

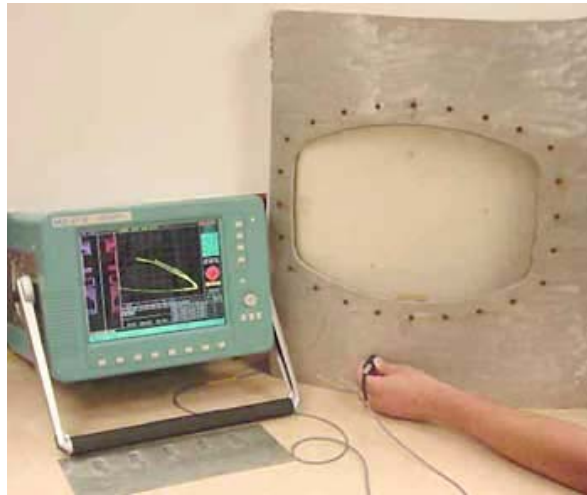
<b>Condición Del Tratamiento Térmico</b>	<b>Esfuerzo de rotura</b>	<b>Esfuerzo de tensión</b>	<b>Conductividad Eléctrica</b>
(o) recocido	ksi 26 (180 MPa)	ksi 11 (75 MPa)	50 % de IACS
Solución tratada térmicamente y envejecido naturalmente (T42)	ksi 64 (440 MPa)	ksi 42 (290 MPa)	30 % de IACS
Solución tratada térmicamente, Trabajado en frío y envejecido artificialmente (T861)	ksi 70 (485 MPa)	ksi 66 (455 MPa)	38 % de IACS

Tabla 5-1: Tratamiento térmico y características producidas sobre el material.

### **5.5.6 Medidas de espesores de materiales delgados**

Las técnicas de la corriente de Eddy se pueden utilizar para realizar un número de medidas dimensionales (Fig. 5-38). El tipo de medidas que pueden ser hechas incluye:

- Mediciones del espesor de hojas delgadas de metal.
- Dimensiones seccionadas transversalmente de tubos y de barras cilíndricas
- Espesor de capas no metálicas en los sustratos metálicos



**Fig. 5-38: Medición de espesores de materiales delgados**

#### **5.5.6.1 Desgaste por corrosión.**

Un uso donde la técnica de las corrientes se utiliza comúnmente es para medir el grueso de material mediante la detección y la caracterización del daño de la corrosión en las capas de láminas. Las técnicas de las corrientes se pueden utilizar para chequear puntos o se pueden utilizar para examinar áreas pequeñas. La inspección de las corrientes de Eddy tiene una ventaja sobre el ultrasonido ya que no se requiere ningún acoplador mecánico para energizar la estructura. Por lo tanto, en las áreas de varias capas de la estructura como en los empalmes, la corriente de Eddy puede determinar si el desgaste por corrosión está presente en las capas inferiores.

La inspección de las corrientes tiene una ventaja sobre la radiografía para este uso porque solamente se requiere el acceso a un lado de la superficie para realizar la inspección. Conseguir un pedazo de lámina en el lado trasero de la capa del avión puede requerir quitar mobiliarios, paneles, y aislamiento interiores que podrían ser muy costosos. Se están desarrollando las técnicas avanzadas de las corrientes que pueden determinar cambios de espesor abajo del tres por ciento del espesor de la capa (Fig. 5-39).



**Fig. 5-39: Inspección en los empalmes del fuselaje de un avión.**

#### **5.5.6.2 Mediciones de espesor de láminas de conductores delgados**

Las técnicas de las corrientes se utilizan para medir el espesor de las láminas, tiras y de láminas calientes en molinos de balanceo, y para medir la cantidad de desgaste del metal ocurrido en un cierto plazo debido a la corrosión del fuselaje del avión. En el plano de la impedancia, las variaciones del espesor exhiben el mismo tipo de respuesta de la señal de la corriente como defecto subsuperficial, excepto que la señal representa un vacío del tamaño y de profundidad infinitos. El patrón de la rotación de fase es igual, pero la amplitud de la señal es mayor.

Al hacer esta medida, es importante tener presente que la profundidad de la penetración de las corrientes debe cubrir la gama entera de los espesores que son medidos. Típicamente, se selecciona una frecuencia que produce cerca de una profundidad estándar de la penetración en el grueso máximo. Desafortunadamente, en frecuencias más bajas, se necesita a menudo conseguir la penetración necesaria, la impedancia de la punta de prueba es más sensible a los cambios en la conductividad eléctrica. Así, los efectos de la conductividad eléctrica no pueden ser eliminados y es importante verificar que cualquier variación de la conductividad sobre la región del interés está en un nivel suficientemente bajo.

#### **5.5.6.3 Medidas de dimensiones seccionadas transversalmente de tubos y barras cilíndricas**

Las dimensiones de tubos y barras cilíndricas se pueden medir con las bobinas del OD o las bobinas axiales internas, cualquiera es apropiada. La relación entre el cambio en impedancia y el cambio en diámetro es bastante constante, excepto en frecuencias muy bajas. Sin embargo, las ventajas del funcionamiento en una frecuencia normalizada más alta son dobles. Primero, la contribución de cualquier cambio de la conductividad a la impedancia de la bobina llega a ser menos importante y puede ser eliminada fácilmente. En segundo lugar, hay un aumento en sensibilidad de la medida resultando del valor más alto del componente inductivo de la impedancia. Los usos típicos incluyen las excentricidades que miden de los diámetros de tubos, barras y el espesor de las paredes del tubo. Los tubos largos son probados a menudo pasándolos a una velocidad constante con el cerco de las bobinas (generalmente diferenciadas).

Un uso importante de la medida del espesor de la pared del tubo es la detección grave de la corrosión, externa e interna. Las puntas de prueba internas se deben utilizar cuando la superficie externa no es accesible, por ejemplo al probar las tuberías que son enterradas o apoyadas por los soportes.

#### **5.5.6.4 Medida del espesor de capas de conductores finos.**

También es posible medir el espesor de una capa delgada del metal en un substrato bimetálico, con tal que los dos metales tengan conductividades eléctricas muy distintas (tal como plata y plomo donde  $\sigma = 67$  y  $10$  MS/m, respectivamente). Se debe seleccionar una

frecuencia tal que haya penetración completa de la corriente en la capa, pero no del sustrato en sí mismo. El método también se ha utilizado con éxito para medir el espesor de capas protectoras muy finas de metales ferromagnéticos (es decir cromo y níquel) en bases no ferromagnéticas del metal.

Se prefieren generalmente las bobinas de diámetro pequeño para punta de prueba, para proporcionar sensibilidad muy alta y reducir al mínimo, los efectos relacionados con las variaciones de la característica o del espesor del metal cuando están utilizadas conjuntamente con frecuencias convenientemente altas de la prueba. La meta es confinar el campo que magnetiza, y la distribución de la corriente de eddy que resulta, justo más allá de la capa fina y reducir al mínimo el campo dentro de los metales delgados.

### **5.5.7 Medidas de espesor de capas no conductoras en materiales conductores**

El espesor de capas no metálicas en los sustratos del metal se puede determinar simplemente con el efecto del Lift-Off en impedancia. Este método tiene uso extenso para medir el espesor de la pintura y de las capas plásticas (Fig. 5-40). La capa sirve como espaciador entre la punta de prueba y la superficie conductora. Mientras que la distancia entre la punta de prueba y el metal conductor aumenta, la fuerza del campo de la corriente de Eddy disminuye porque hay una menor interacción del campo magnético entre la punta de prueba y el metal. Los espesores entre 0.5 y 25  $\mu\text{m}$  se pueden medir a una exactitud entre el 10% para valores más bajos y el 4% para valores más altos. Las contribuciones a los cambios de la impedancia debido a las variaciones de la conductividad deben ser eliminadas, a menos que se sepa que las variaciones de la conductividad son insignificantes, según lo encontrado normalmente en frecuencias más altas.



Fig. 5-40: Medición de espesores de capas no conductoras en metal base conductor.

Las medidas se pueden hacer con un detector estándar y un bloque de calibración. La señal de la punta de prueba en el aire es cero estableciendo la señal de inicio. La localización de la señal está marcada en la pantalla mientras que la punta de prueba se pone en el bloque de calibración en áreas donde el espesor de la capa disminuye. Cuando la punta de prueba se pone sobre la superficie del patrón de calibración, la posición de la señal se moverá desde la posición en el aire (lectura en vacío) a un punto donde se pueda correlacionar a las marcas de calibración.

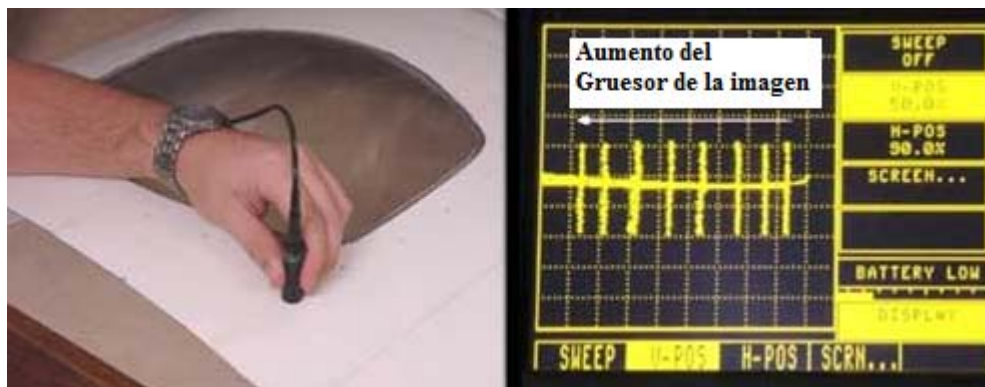


Fig. 5-41: Calibración de las puntas de prueba con bloque patrón.

Los detectores de capa especializados de espesores de la corriente de Eddy están también disponibles y son a menudo clasificados como de bolsillo con la punta de prueba que se asemeja a un lápiz pequeño. Estos funcionan por una batería pequeña y proporcionan generalmente lecturas digitales en las unidades apropiadas de las superficies. Los ajustes de la calibración, algunos de los cuales son colocados por estándares tales como EN 2360

(1995) de BS y ASTM B 244 y E 376, se pueden asistir por el uso de un microprocesador incorporado.

## **5.6 Técnicas avanzadas**

### **5.6.1 Exploración**

Los datos de la corriente se pueden recoger usando sistemas de exploración automatizados para mejorar la calidad de las medidas y para construir imágenes de áreas exploradas. El tipo más común de exploración es la línea de exploración donde un sistema automatizado se utiliza para empujar la punta de prueba a una velocidad fija. La línea de sistemas de la exploración se utiliza a menudo al realizar inspecciones del tubo o la lámina del motor de avión, inspecciones de ranura, donde es necesaria la exploración en una dimensión. La ventaja de usar un sistema lineal de la exploración es que la punta de prueba está movida a una velocidad constante, así que las indicaciones en la carta de la tira se pueden correlacionar a una posición respecto a la pieza que es explorada. Como con todos los sistemas de exploración automatizados, las variables del operador, tales como oscilaciones de la punta de prueba, se reducen.

Los sistemas de dos dimensiones de la exploración se utilizan para explorar un área de bidimensional. Éste podría ser un sistema de la exploración que explora sobre un área relativamente plana en un modo de la trama de X-Y, o podría ser un sistema de la inspección del agujero de perno que rota la punta de prueba mientras que se mueve en el agujero. Los datos se exhiben típicamente mientras que un diagrama del falso-color de la fuerza de la señal o de la cambio del ángulo de la fase en función de la posición, apenas como un ultrasónico C-explora la presentación. Se muestra en la Fig. 5-42 un sistema portable de la exploración que se diseña para trabajar en las capas de las secciones del fuselaje del ala de un avión.

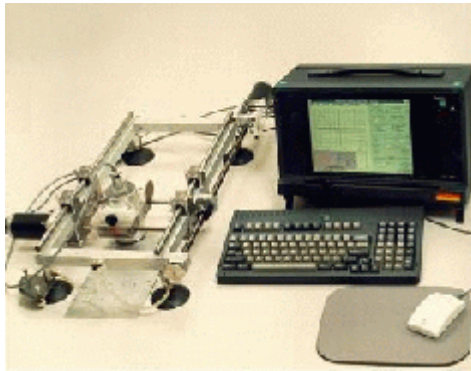


Fig. 5-42 Sistema portable de la exploración que se diseña para trabajar en las capas de las secciones de fuselaje de aviones.

Se enumeran abajo algunas ventajas de exploración automatizadas:

- ☞ Reduce al mínimo cambios en el factor de Lift-Off resultando de la oscilación de la punta de prueba, de superficies desiguales y de la excentricidad de los tubos causados por la fabricación o el daño.
- ☞ Indecisión de direcciones exactas.
- ☞ Capacidad de repetición.
- ☞ Mapa de alta resolución

### **5.6.2 Técnicas con armónicos y múltiples**

Las técnicas múltiples de la corriente de Eddy de la frecuencia implican simplemente el recoger los datos en diversas frecuencias, compararlas y mezclarlas de cierta manera.

La necesidad de frecuencias múltiples son necesarias por eso se considera una información de fondo al respecto; la impedancia de una punta de prueba de la corriente de Foucault se puede afectar por los factores siguientes:



- ☞ Variaciones de frecuencia en funcionamiento
- ☞ Variaciones en conductividad eléctrica y la permeabilidad magnética de un objeto o de una estructura, causada por los cambios estructurales tales como estructura del grano, trabajo de endurecimiento, tratamiento de calor, etc.
- ☞ Cambios en factor del Lift-Off resultando de la oscilación de la punta de prueba, de superficies desiguales, y de la excentricidad de los tubos causados en la fabricación o el daño.
- ☞ La presencia de los defectos superficiales tales como grietas, y defectos subsuperficies tales como vacíos e inclusiones no metálicos.
- ☞ Cambios dimensionales, por ejemplo, el desgaste de las paredes del tubo debido a la corrosión, a la adherencia de los depósitos de metal o del lodo, y a los efectos de abolladura.
- ☞ La presencia de ayudas, de paredes, y de soportes.
- ☞ La presencia de discontinuidades tales como bordes.

Varios de estos factores están a menudo presentes simultáneamente. En el caso simple donde el interés se confina a detectar defectos u otros cambios precipitados en geometría, una punta de prueba diferenciada se puede utilizar para eliminar factores indeseados, con tal de que varíen de una manera gradual. Por ejemplo, las variaciones en conductividad eléctrica y el desgaste de tubo afectan ambas bobinas de una punta de prueba diferenciada simultáneamente. Sin embargo, si los parámetros indeseados que ocurren precipitadamente están afectando las medidas, pueden ser negados a veces mezclando las señales recogidas en varias frecuencias.

Un ejemplo de donde se utiliza una inspección de múltiples frecuencias de la corriente de Eddy está en inspecciones del tubo del intercambiador de calor. Los ensambles del intercambiador de calor son a menudo una colección de tubería que tienen soportes en el exterior. Al procurar examinar el espesor completo de pared de la tubería, la señal del soporte de montaje es a menudo molesta. Recogiendo una señal en la frecuencia necesaria para examinar el grueso completo del tubo y restando una segunda señal recogida en una frecuencia más baja (que sea más sensible al soporte pero menos sensible a las características en la tubería), los efectos del soporte pueden ser reducidos.

Hay un número de instrumentos de múltiples frecuencias comercialmente disponibles de la corriente de Eddy ver Fig. 5-43, La mayoría funcionan en solamente dos frecuencias a la vez pero algunas unidades pueden recoger datos en hasta cuatro frecuencias simultáneamente. Las medidas de múltiples frecuencias se pueden también hacer usando un analizador de la impedancia pero este equipo no es generalmente conveniente para las medidas en el terreno. Un sistema típico del analizador de la impedancia se demuestra abajo. El interés en instrumentos es impulsado en gran parte debido a la capacidad de la corriente de Eddy, esencialmente, realiza medidas de múltiples frecuencias muy rápidamente y fácilmente.

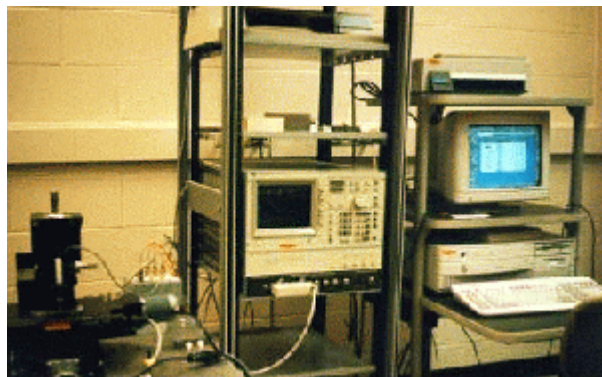


Fig. 5-43 Instrumentos múltiples de frecuencias comerciales para medir corrientes de Eddy.

### **5.6.3 Frecuencia de barrido**

Las técnicas de la frecuencia barrido de la corriente implican el recoger los datos de la corriente en una amplia gama de frecuencias. Esto implica generalmente el uso de una parte

especializada del equipo tal como un analizador de la impedancia, que se puede configurar para hacer automáticamente medidas sobre una gama de frecuencias. La técnica de la frecuencia de barrido se puede poner en ejecución con el equipo comercial pero es una medida difícil y desperdiciadora de tiempo. La ventaja de una medida de barrido de la frecuencia, es que la información de la profundidad puede ser obtenida puesto que la penetración de la corriente varía en función de la frecuencia.

Las medidas barrido de la frecuencia son útiles en usos tales como medir el espesor de capas conductoras en el metal conductor, distinguiendo entre los defectos en las capas superficiales y los defectos a bajo en el metal y distinguiendo entre los defectos en varias capas de la estructura urbanizada. Un uso del ejemplo sería el empalme de las capas de un avión comercial. Las medidas de barrido de la frecuencia permitirían decir si el agrietamiento ocurría en la capa externa, la capa interna o una capa doble. En la Fig. 5-44 está un ejemplo del tipo de datos que se puedan obtener de la técnica del barrido de frecuencia.

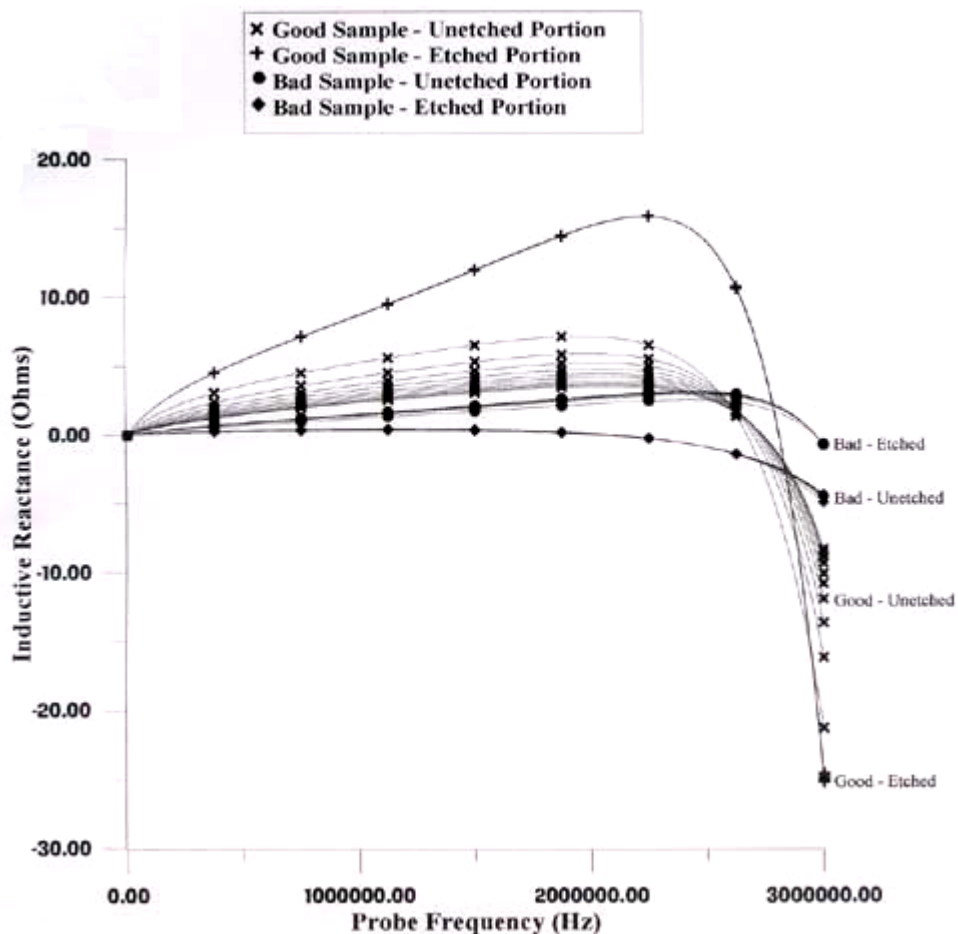


Fig. 5-44 Técnica de la frecuencia de barrido.

En este diagrama se puede ver que en las condiciones del material etiquetado como “bueno” muestra una respuesta muy diversa de la señal que muestra el material etiquetado como “malo”.

Puede también ser visto que una frecuencia de alrededor 2.2 MHz proporciona la separación más grande de las curvas. Por lo tanto, esta frecuencia debe ser utilizada si una sola frecuencia se utiliza para clasificar las piezas hechas de los dos metales.

#### 5.6.4 Inspección pulsada de la corriente de Eddy

Las técnicas convencionales de la inspección de la corriente utilizan la corriente eléctrica que se alterna sinusoidalmente de una frecuencia particular para excitar la punta de prueba. La técnica pulsada de la corriente es utilizado un voltaje de la función del paso para excitar

la punta de prueba. La ventaja de usar un voltaje de la función del paso es que contiene una serie continua de frecuencias. Consecuentemente, la respuesta electromagnética a diversas frecuencias se puede medir con apenas un solo paso. Puesto que la profundidad de la penetración es dependiente en la frecuencia de la excitación, la información de una gama de profundidades se puede obtener de una vez. Si las medidas se hacen en el dominio de tiempo (en la que se muestra fuerza de la señal en función de tiempo), las indicaciones producidas por los defectos u otras interrupciones cerca de la bobina de la inspección será visto primero y características más distantes serán consideradas más adelante en el tiempo.

Los defectos, la conductividad, y los cambios dimensionales producen un cambio en la señal y una diferencia entre la señal de la referencia y la señal de la medida. La distancia del defecto y otras características concerniente a la punta de prueba causará que la señal cambie de puesto en el tiempo. Por lo tanto, las técnicas que bloquean del tiempo (como en la inspección ultrasónica) se pueden utilizar para ganar la información sobre la profundidad de una característica del interés.

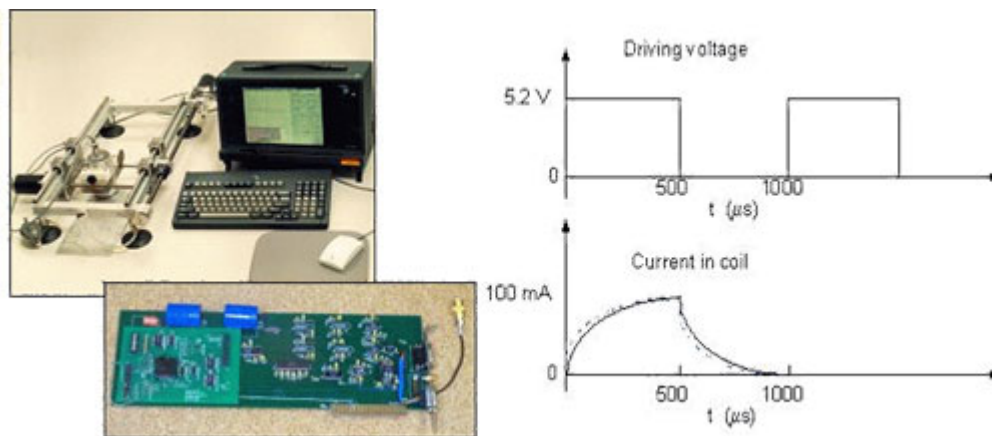


Fig. 5-45 Técnica de la inspección pulsada de corriente.

### **5.6.5 Detección alejada del Campo**

La corriente de prueba para los defectos externos en tubos donde no está posible el acceso externo (las tuberías enterradas), se conduce usando puntas de prueba internas.

Las dificultades encontradas en la prueba interna de tubos ferromagnéticos se pueden aliviar grandemente con el uso del método alejado del campo de la corriente de Eddy.

Este método provee de la penetración directa en las paredes en tres veces la frecuencia máxima posible el método directo convencional del campo. Esta técnica fue introducida por Schmidt en 1958. Aunque ha sido utilizada por la industria petrolera para detectar la corrosión en sus instalaciones desde los años 60, en un tiempo muy temprano, ha despertado interés general recientemente. Este interés está en gran parte porque el método es altamente sensible a las variaciones de espesor de pared, pero relativamente insensible al factor de llenado. El método tiene la ventaja agregada de permitir sensibilidades iguales de la detección en las superficies internas y externas de un tubo ferromagnético. No puede, sin embargo, distinguir entre las señales de estas superficies respectivas.

## **6.0 Análisis por radiografía industrial (rayos X)**

---

Hace ya más de 100 años que el hombre descubrió los Rayos X, llamados así, porque de momento no sabían que eran, la científico polaco Marie Curie y su esposo Pierre Curie, el científico francés de algunos materiales compuestos de Uranio y luego después de su descubrimiento inicial descubrió otro elemento radiactivo en la peachblenda al cual se llamó Polonio en honor a la patria natal de Curie.

Más tarde ese mismo año los Curie descubrieron otro elemento radioactivo al que llamaron Radio. Tanto el Polonio como el Radio eran más radiactivos que el Uranio.

Por su trabajo sobre la radioactividad, los Curie fueron galardonados con el Premio Nobel 1903 de física. En 1910, Marie Curie fue galardonada con el Premio Nobel de Química por sus descubrimientos del Radio y el Polonio, convirtiéndose así en la primera persona en recibir dos Premios Nobel. Hoy en día se producen muchos materiales radiactivos artificiales en diversas formas cuyos usos van desde médicos e industriales. Ahora, tenemos muchas aplicaciones pacíficas del uso de la Energía Nuclear. Una de ellas es la Radiografía Industrial.

### **6.1 Radiografías y fotografías.**

Se podría cometer el error de confundir la radiografía con la fotografía por tener procesos similares a continuación se establecerá la diferencia entre ambas:

Hay varias características en las fotografías y rayos X que son similares y, sin embargo, hay diferencias muy distintas ver Fig. 6-1. Tal vez lo que tiende a confundir muchas veces es que tanto la Radiografía como la fotografía suelen utilizar algún tipo de película para registrar la imagen. El principio de diferencia está en cómo esta imagen se graba en la película.



Fig. 6-1: Ilustración de la comparación entre una fotografía a la izquierda versus la radiografía del mismo objeto a la derecha.

En **la fotografía**, la imagen de la película se produce debido a la reflexión de la luz. Cuando se quiere tomar una foto, se utiliza una cámara, que cuenta con un obturador que se abre y se cierra permitiendo que la luz impresione la película. La cantidad de luz que interactúa con la película determina la impresión de la imagen que aparece en la fotografía.

En **la radiografía**, el proceso para producir una imagen es muy diferente. La cámara es en realidad una fuente de radiación que funciona muy diferente a una cámara fotográfica. *La película no está colocada dentro de la cámara, sino que se coloca en el sitio opuesto de la imagen objeto.* La radiación no se refleja a la película, sino que pasa a través del objeto y a continuación sensibiliza la película. La imagen de la película depende de cuánto de la radiación pasa a través del objeto y alcanza la película. Algunos materiales como el hueso y metal obstaculizan más de la radiación que pasa por ellas en relación de los materiales



como el plástico y carne. La cantidad de material a través del cual los rayos X deben viajar también afecta la cantidad de rayos X que alcanzan la película. Las diferencias en el tipo de material y cantidad que los rayos X deben penetrar se encargan de los detalles en la imagen.

Definición de radiografía industrial:

*La inspección por RI se define como un procedimiento de inspección no destructivo de tipo físico, diseñado para detectar discontinuidades macroscópicas, variaciones y/o fallas en la estructura interna o configuración física de un material el cual absorbe de forma diferenciada radiación penetrante.*

Dentro de los END, la Radiografía Industrial es uno de los métodos más antiguos y de mayor uso en la industria. Debido a esto, continuamente se realizan nuevos desarrollos que modifican las técnicas radiográficas aplicadas al estudio no sólo de materiales, sino también de partes y componentes; todo con el fin de hacer más confiables los resultados durante la aplicación de la técnica.

La radiación ionizante que logra traspasar el objeto puede ser registrada por medio de la impresión en una placa o papel fotosensible, que posteriormente se somete a un proceso de revelado para obtener la imagen del área inspeccionada; o bien, por medio de una pantalla fluorescente o un tubo de video, para después analizar su imagen en una pantalla de televisión o grabarla en una cinta de video. En términos generales, es un proceso similar a la fotografía, con la diferencia principal de que la radiografía emplea rayos X o rayos Gamma y no energía luminosa.

La radiación electromagnética, es una forma de energía, que dependiendo de su *naturaleza y su longitud de onda*, será su habilidad de penetración; por ejemplo: Los Rayos Alfa ( $\alpha$ ) tienen poco poder de penetración y pueden detenerse con una hoja de papel. Como el caso de Chernobyl, los Rayos Beta ( $\beta$ ) penetran la piel, por eso su peligrosidad cuando el material radiactivo se adhiere a esta. Los Rayos Gamma ( $\gamma$ ), penetran varias pulgadas de materiales densos como el acero, por eso son utilizados en la industria, junto con los

aparatos generadores de Rayos X El secreto está en la longitud de onda que se utiliza, ésta es corta por eso tiene alta penetración.

La Fig. 6-2 muestra el principio de esta técnica la cual consiste en que cuando la energía de los rayos X o gamma atraviesa una pieza, sufre una atenuación que es proporcional al espesor, densidad y estructura del material inspeccionado. Posteriormente, la energía que logra atravesar el material es registrada utilizando una placa fotosensible, de la cual se obtiene una imagen del área en estudio.

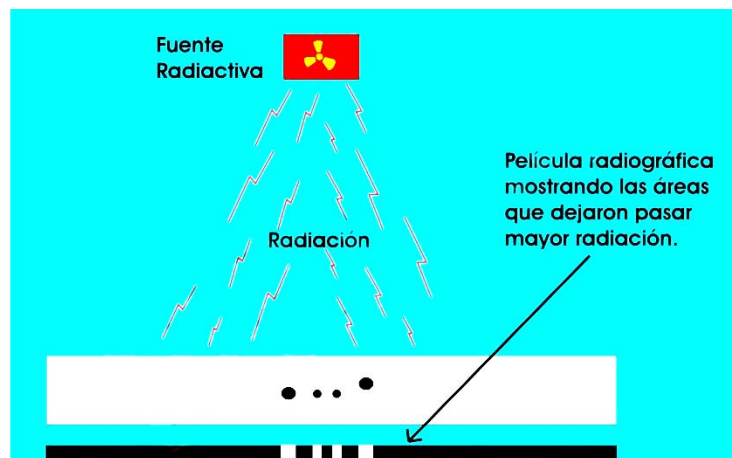


Fig. 6-2: Esquema que muestra el principio de la técnica de radiografía industrial.

La atenuación de la radiación ionizante es:

Directamente proporcional al espesor y densidad del material.

Inversamente proporcional a la energía del haz de radiación.

Las diferencias de atenuación producen diferencias en la ionización del bromuro de plata de la película radiográfica y esto provocara (al revelar la película) cambios de densidad radiográfica (grado de ennegrecimiento).

Un área oscura (alta densidad) en una radiografía, puede deberse a un menor espesor o a la presencia de un material de menor densidad como escoria en una soldadura o una cavidad por gas atrapado en una pieza de fundición.

Un área más clara (menor densidad) en una radiografía, puede deberse a secciones de mayor espesor o un material de mayor densidad como una inclusión de tungsteno en una soldadura de arco eléctrico con electrodo de tungsteno y gas de protección.

Una radiografía es una imagen registrada en una placa o película fotográfica ver Fig. 6-3. La imagen se obtiene al exponer dicha placa o película a una fuente de radiación de alta energía, comúnmente rayos X o radiación gamma procedente de isótopos radiactivos.



**Fig. 6-3:** Fotografía que muestra como se lleva a cabo una radiografía In Situ con un equipo de radiación gamma.

### **6.1.1 Equipo.**

Entre el equipo usado en la radiografía tanto de rayos x como gammagrafía existe una gran variedad pero todos utilizan el mismo principio, muestra de estos equipos se pueden ver a continuación en la Fig. 6-4.



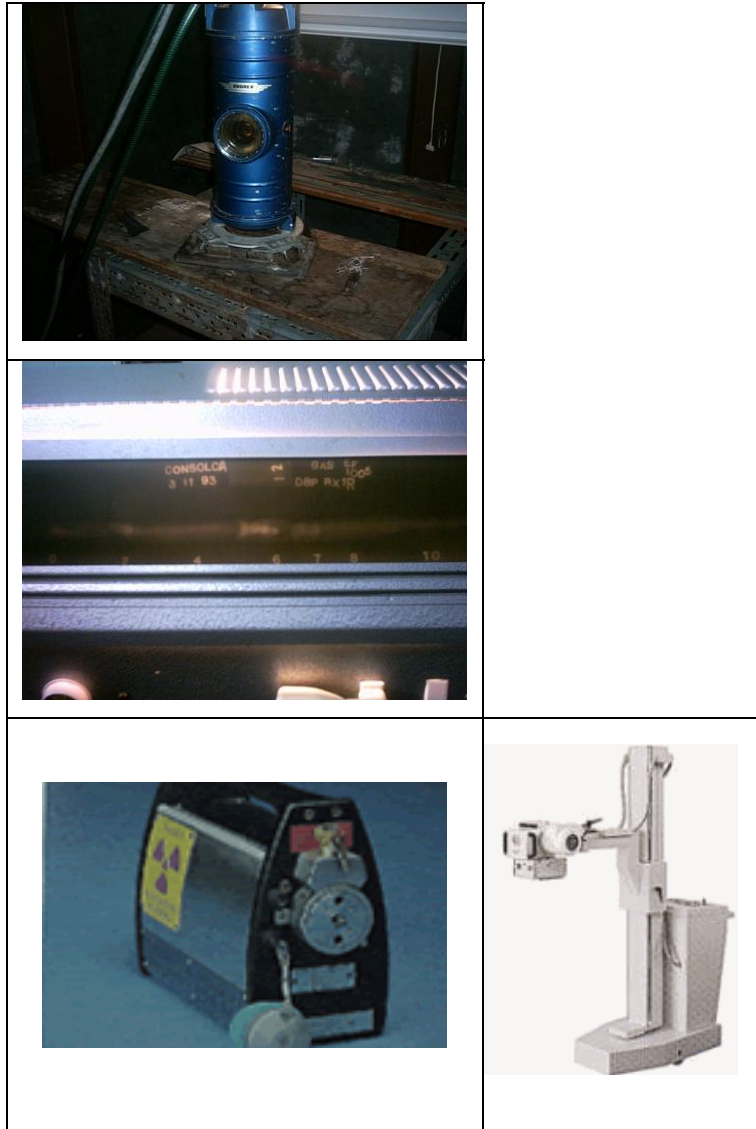


Fig. 6-4: Fotografías que muestran equipos utilizados en la radiografía, en la primera aparece un control típico, en la segunda el extremo de un canal donde se expone la fuente radioactiva, en la tercera una consola utilizada en rayos x y en las últimas dos, a la izquierda un equipo portátil de gammagrafía del tipo cámara y a la derecha un equipo de generación de rayos x.

### **6.1.2 Indicadores de calidad de imagen ICI(penetrómetros)**

Los indicadores de calidad de imagen antiguamente mal llamados penetrómetros consisten en alambres o plaquetas escalonadas, de medidas y tamaños estandarizados cuyos diámetros o espesores representan por ej. el 1%, 2%, 3% del espesor máximo del objeto, permitiendo evaluar por comparación la calidad radiográfica.

El indicador se coloca sobre la cara del objeto que enfrenta la radiación en la parte más alejada de la película (zona de mayor espesor) y en la posición geométricamente más

desfavorable, por ejemplo, en el extremo más alejado respecto del punto en que la radiación incide normalmente. El espesor del hilo o escalón más delgado que sea visible en la radiografía, es el que permite evaluar la calidad de la técnica radiográfica.

Básicamente son de 3 tipos (los más utilizados):

**1) - ASME - (U.S.A.)** Consta de una placa con un número de plomo que indica el rango, y 3 agujeros, cuyo diámetro es un porcentaje del espesor a radiografiar 1T, 2T y 4T. ver Fig. 6-5 Este indicador de calidad de imagen responde a las especificaciones de la American Society of Mechanical Engineers. El espesor normal del indicador es igual al 2 % del espesor a radiografiar, este espesor se indica con números de plomo ver ejemplos de números en la Fig. 6-9 cuya altura no ha de ser inferior a  $3/32$ " (2,4 mm.).

**2) - DIN - (Alemania).** Este penetrómetro consiste en una serie de hilos de diferente diámetro, también proporcionales al espesor a radiografiar De acuerdo a la norma DIN 54.109, la calidad de imagen se caracteriza por el alambre más delgado de una serie de alambres de diversos diámetros que varían según la progresión geométrica. Estos van embutidos en un material plástico transparente. Ver Fig. 6-6

**3) - AFNOR (Francia) -** Este tipo es un hexágono con 6 escalones y perforaciones en cada uno de ellos, cada escalón se basa en un rango de espesores, y las perforaciones son equivalentes a los del tipo ASME ver Fig. 6-7.

Aunque también la **ASTM** de origen Estadounidense es utilizada; esta tiene los patrones similares a la DIN como se puede ver en la Fig. 6-8.

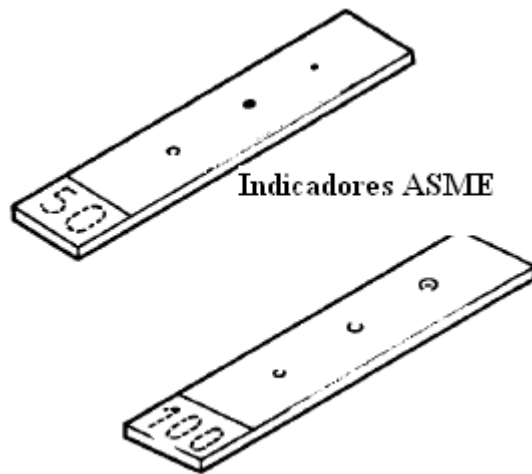


Fig. 6-5 Indicadores ASME del tipo de placa.

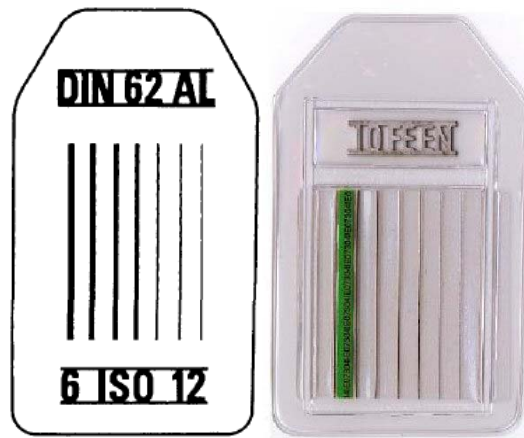


Fig. 6-6: Indicadores DIN del tipo de hilos.

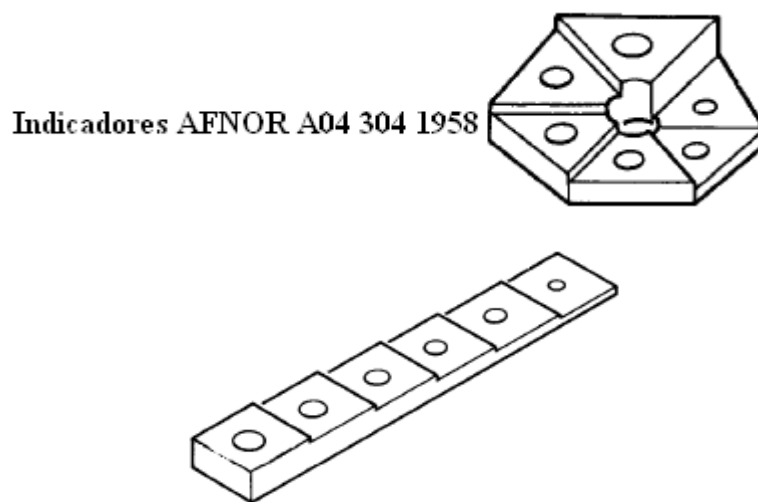


Fig. 6-7: Indicadores AFNOR del tipo de hexágono y de escalerilla.



a) Penetrómetros ASTM SE-1025. Tipo agujeros, grupo 1 (aceros al carbono y aceros inoxidable),



b) ASTM SE-747. Tipo hilos, grupo 1

Fig. 6-8: Indicadores ASTM.



Fig. 6- 9: Juego de letras (A-Z) de 6, 9 ó 12 mm y de números del (0-9) de 6, 9 ó 12mm.

### **6.1.2.1. Modo de uso.**

Los ICI son radiografiados conjuntamente con la pieza sujeta a prueba y es importante tratar de ubicarlos en las regiones consideradas como máximo espesor (Ejemplo sobre el cordón de soldadura si es una soldadura la que se va a radiografiar), o las de mayor dificultad para dicha prueba, y cerca de la esquina u orilla de la proyección sobre la película radiográfica ver Fig. 6-10. Gracias a esta ubicación se puede apreciar qué tanto penetró la radiación tanto en el ICI como en la pieza ofreciendo la idea de la correcta ejecución de la radiografía ver figura 6-11, es decir, el código en función del espesor de la pieza a radiografiar exige que se vea en la imagen radiográfica un determinado hilo (si se está usando un ICI de este tipo) .En la Fig. 6-12 se puede observar distintos porcentajes de

penetración en un ICI quien tiene un determinado diámetro conocido y estandarizado, por tanto, al verlo en la radiografía ofrece una idea del tamaño de defecto que puede llegar a observarse.

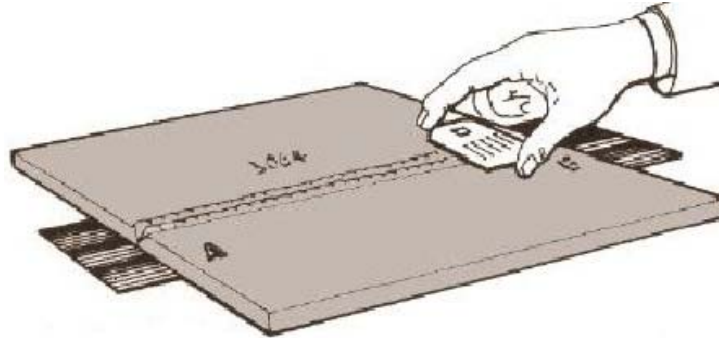


Fig. 6-10: Se muestra la colocación normal de un ICI.

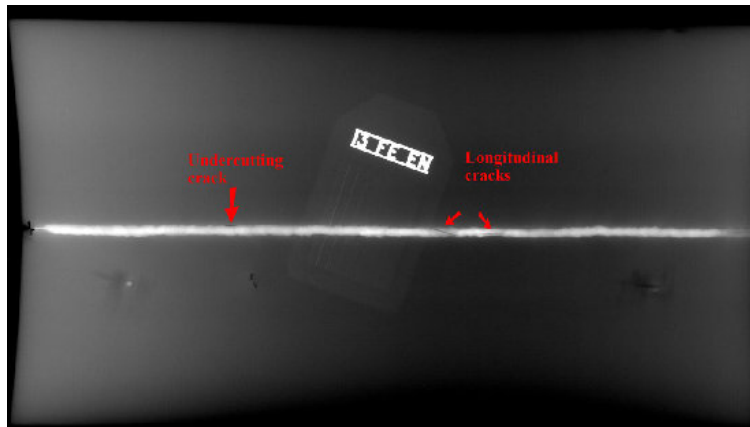


Fig. 6-11: Fotografía que muestra al fondo un ICI

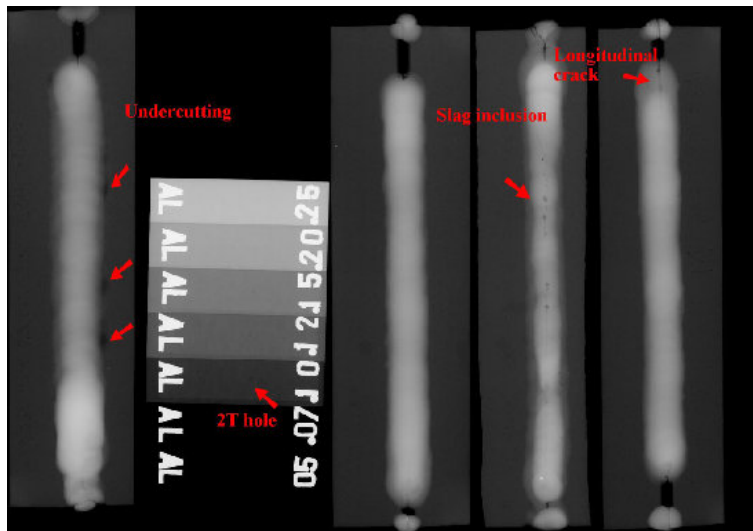


Fig. 6-12: Fotografía que muestra distintos porcentajes de penetración que tuvo un ICI en unos cordones de soldadura.



## **6.2 Técnicas empleadas en la inspección radiográfica industrial.**

En la actualidad, dentro del campo de la industria existen dos técnicas comúnmente empleadas para la inspección radiográfica:

- ☞ **Radiografía con rayos X.**
- ☞ **Radiografía con rayos gamma.**

La principal diferencia entre estas dos técnicas es el origen de la radiación electromagnética; ya que, mientras los rayos X son generados por un alto potencial eléctrico, los rayos gamma se producen por desintegración atómica espontánea de un radioisótopo.

Los rayos X son generados por dispositivos electrónicos y los rayos gamma por fuentes radioactivas naturales o por isótopos radioactivos artificiales producidos para fines específicos de Radiografía Industrial, tales como: iridio 192, cobalto 60, cesio 137 y tulio 170.

La fuente de rayos X es el ánodo en un tubo eléctrico de alto voltaje. Cuando se activa, el haz de electrones generado en el cátodo impacta sobre el ánodo y esto provoca la emisión de los rayos X en todas direcciones; la capa de blindaje alrededor del tubo absorbe los rayos X, excepto aquellos que escapan a través de un orificio o ventana que existe para tal fin. Los rayos que pasan se emplean para producir la radiografía. Cuando se desactiva la máquina de rayos X, la radiación cesa y la pieza inspeccionada no conserva radioactividad.

Aunque existen arreglos especiales, diseñados para casos determinados, el equipo que se emplea con más frecuencia para la inspección radiográfica es el siguiente:

1. Fuente de radiación (rayos X o rayos gamma).
2. Controles de la fuente.
3. Película radiográfica.
4. Pantallas intensificadoras.

5. Indicadores de calidad de la imagen.
6. Accesorios.

### **6.2.1 Características de los rayos X y gamma.**

1. Cumplen con la ecuación:  $V = \lambda F$
2. Son ondas electromagnéticas.
3. No tienen carga eléctrica ni masa.
4. Viajan en línea recta.
5. Penetran la materia y el poder de penetración depende de la energía.
6. Ioniza la materia.
7. El material radiado queda con una fluorescencia de tipo no permanente
8. Son invisibles.
9. Destruyen las células vivas.

### **6.2.2 Isótopos radiactivos comerciales.**

En la industria los isótopos radiactivos más utilizados comercialmente son el Iridio 192 principalmente para la Radiografía Industrial, ya que generan espontáneamente energía capaz de hacer una radiografía en el acero con espesores desde ½” hasta 2½”. El Cobalto 60, también se utiliza aunque para espesores más gruesos de hasta 12” y se vuelve difícil de manejar por su tamaño y peso del equipo complementario para su manejo seguro, por lo que se utilizan otros métodos como el Ultrasonido. El Cesio 137, se utiliza más en aparatos de calibración y de medición por sus propiedades.

#### **6.2.2.1 Obtención de los isótopos.**

Son obtenidos principalmente:

- ☞ Como producto de la fisión nuclear; son recolectados y separados del mineral de deshecho en un reactor atómico.
- ☞ Por bombardeo de neutrones a átomos para que su núcleo capture neutrones y se tornen radioactivos sin cambiar a otro material o elemento.

Productos de la fisión nuclear

La siguiente tabla muestra algunos isótopos radiactivos:

ISOTOPOS RADIATIVOS COMERCIALES	
PRODUCTOS DE LA FISION NUCLEAR	POR BOMBARDEO DE NEUTRONES
KRIPTON- 83(Kr-83)	COBALTO (Co-60)
ESTRONCIO-90 (Sr-90)	IRIDIO-192 (Ir-192)
CESIO-137 (Cs-137)	TULIO-170 (Tm-170)
BARIO-138 (Ba-138)	

## 6.3 Rayos X.

### 6.3.1 El principio de la radiografía.

Los Rayos X son radiaciones electromagnéticas penetrantes con un rango de la longitud de onda menor que la luz visible en el orden entre 0.001 y 100 nanómetros (el nm).

Los Rayos X tienen las propiedades siguientes.

- (1) ellos no son afectados por los campos magnéticos.
- (2) ellos viajan en las líneas rectas.
- (3) ellos atraviesan los materiales sólidos.
- (4) alguna de su energía está absorbida por los materiales sólidos.
- (5) ellos no pueden desviarse.
- (6) ellos pueden causar daño al tejido humano.

Los Rayos X son generados por un tubo de vacío (ver Fig. 6-13).

Este tipo de tubos son normalmente usados para las inspecciones de aviones pues generan las radiaciones con un rango de la longitud de onda entre aprox. 0.01 y 0.05 nm. Este tubo consiste en un vaso de vacío que contiene un electrodo positivo (el ánodo) y un electrodo negativo (el cátodo). El cátodo contiene un filamento incandescente que emite los electrones cuando está caliente acelerando los electrones entre el cátodo y el ánodo estrellándolos en el blanco o tarjeta causando una generación de calor y radiación x, el cual es controlado por los Kv.

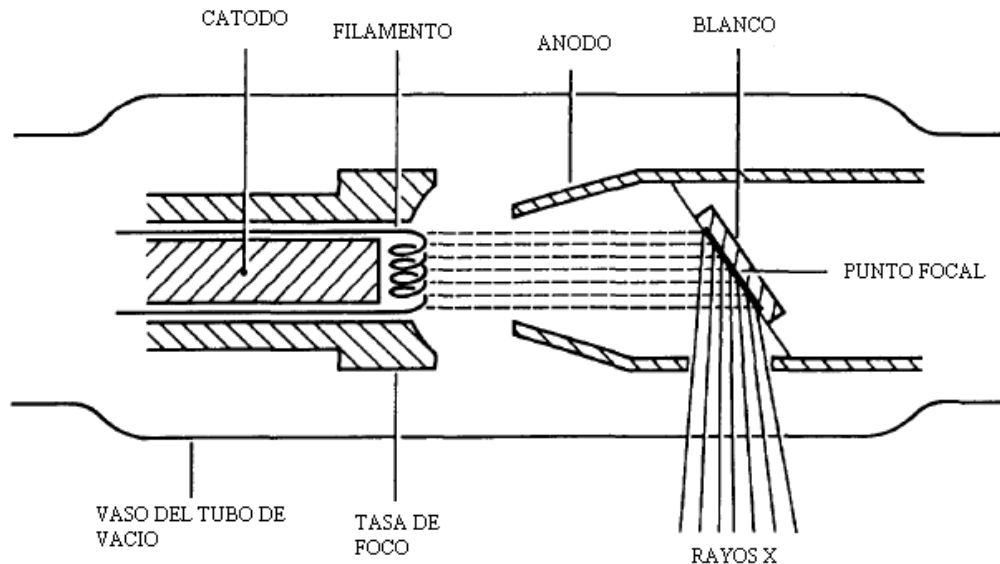


Fig. 6-13: Tubo de vacío utilizado para producir rayos x .

### 6.3.2 Las propiedades de los rayos X.

La intensidad de Los rayos x, es decir el alcance en la película, se disminuye en proporción al espesor y densidad de material que ellos deben atravesar. Esta disminución en la intensidad es causada por la absorción y dispersión de los rayos.

*La absorción.*

La Absorción es proporcional a:

- el espesor de la parte que se radiografió,
- la densidad del material radiografiado,
- el voltaje (el kV) usado.

*Esparcimiento*

La dispersión es proporcional a la densidad y dimensiones de la parte radiografiada. La dispersión se puede dar dentro de la parte en estudio, la superficie, bordes y cerca de los objetos.

La radiación dispersa tiene bajo poder penetrante sin embargo esta radiación perdida puede causar una disminución en la calidad de una imagen radiográfica.

La radiación x tiene energía de longitudes de onda diferentes que penetrarán a través a profundidades diferentes:

- (1) la radiación con las longitudes de onda cortas se llama “la radiación dura”.
- (2) la radiación con las longitudes de onda largas se llama “la radiación suave”.

Tal vez se tenga la interrogante de ¿cómo la radiación penetra un material?

Sabemos que uno de los factores que afectan la ionización es el tipo de material. También sabemos que la radiación tiene más dificultad para penetrar materiales densos, como el metal, que materiales menos densos como el plástico.

La radiación de fotones de la misma energía no penetra en un determinado material a la misma profundidad. Algunos de los fotones chocan con los átomos y pierden su energía antes que otros. Algunos pueden pasar completamente a través del material con una mínima o ninguna interacción. Además, la profundidad de penetración para un determinado fotón de energía depende de la densidad de los materiales (estructura atómica). Si hay más partículas subatómicas en un material (mayor número  $Z$ ), mayor será la probabilidad de que se produzcan interacciones y la radiación perderá su energía. Por tanto, cuanto más denso un material, menor será la profundidad de penetración de la radiación.

Ahora podría surgir también esta pregunta: ¿Cuándo comienza la absorción de la radiación?

Esta comienza tan pronto como la radiación entra en un material. El proceso es progresivo y continúa como la radiación penetra más profundamente en el material. Cantidades adicionales de energía se absorbe a través de los diversos procesos de ionización. En algún momento, hay un nivel en el que la intensidad de radiación se convierte en un medio en la superficie del material. Este fondo se conoce como la mitad de valor de umbral (HVL) para ese material. Cada material tiene sus propias HVL de espesor. No sólo es el material dependiente del HVL, sino que también depende de la energía. Esto significa que para un determinado material, si los cambios en la radiación de energía, el punto en que la intensidad disminuye a la mitad de su valor original también cambiará. En la penetración de los rayos x esta depende mucho de la potencia que se utilice a continuación se muestra la tabla 6-1 que detalla el voltaje necesario para obtener una calidad específica:

Escala de rayos X balanza de dureza radiográfica (Especificaciones DIN 6809)

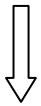
<b>RAYOS X</b>	<b>VOLTAJE DEL TUBO</b>	<b>CALIDAD</b>
Muy suave	debajo de 20Kv	Baja penetración
Suave	20Kv a 60Kv	
Semi-suave	60Kv a 150Kv	
Duro	150Kv a 400Kv	
Muy duro	400Kv a 3000Kv	
Ultraduro	más de 3000Kv	

Tabla 6-1: Voltajes necesarios para obtener una calidad específica.

Si queremos aumentar la energía de la radiación que interactúa con el mismo material, el HVL se producirá más profundo en ese material. Los rayos X y los rayos gamma con longitudes de onda más corta tendrá más energía que debe ser absorbida y, por tanto, más energía hará que sea más profundo en el material o a través del material. Por el contrario, si bajamos la radiación de energía, el HVL se producirá en menor profundidad.

El HVL es útil en la comparación de materiales.

La tabla 6-2 muestra algunos ejemplos de las relaciones entre la radiación de energía y tipos de materiales:

<b>Energía (keV)</b>	<b>El plomo (mm)</b>	<b>Hormigón (mm)</b>
50	0.06	4.32
70	0.18	12.70
100	0.27	15.10
150	0.30	22.32
200	0.52	25.00
250	0.88	28.00
300	1.47	31.21
400	2.50	33.00
1000	7.90	44.45
2000	9.98	62.23

Tabla 6-2: relaciones entre la radiación de energía y tipos de materiales.

De lo anterior se puede establecer que para el acero que es uno de los materiales más utilizado en la industria se debe usar una dosis grande de energía comparada a la que ocuparían los médicos en el cuerpo humano esto es debido a la densidad menor de nuestros

tejidos; siendo esta una principal diferencia entre una radiografía médica y una radiografía industrial

### **6.3.3 Procedimiento de la inspección.**

(1) los detalles de un tubo para la radiografía y posiciones de la película y demás parámetros de la exposición se deben especificar para cada procedimiento específico.

(2) los factores siguientes se han tenido en la cuenta durante el desarrollo de cada procedimiento específico:

- la especificación material,
- el espesor de la parte,
- la configuración estructural,
- el voltaje de tubo de radiografía y corriente,
- el uso de pantallas
- la distancia de la fuente-a-película (SFD),
- el tipo de discontinuidad.

(3) la Representación que hace el diagrama de exposición del Aluminio, relaciona a la radiografía y el material, la especificación, se usa para ayudar a determinar los parámetros de la exposición. Como ejemplo un diagrama típico de la exposición para aluminio se muestra en la Fig. 6-14.

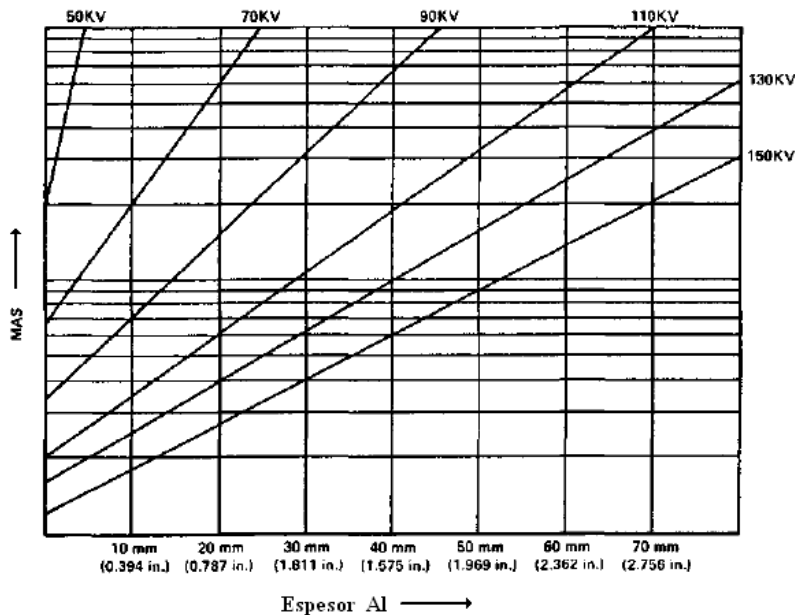


Fig. 6-14: Diagrama típico de exposición para el aluminio.

## 6.4 Gammagrafia.

La gammagrafia industrial es una técnica de Ensayos No Destructivos (END) que se utiliza para estudiar la integridad y calidad de soldaduras, y del material de tuberías, tanques, piezas metálicas diversas, etc. Su uso es intensivo durante la construcción de grandes piezas metálicas, en el montaje de plantas industriales, en el tendido de oleoductos, y durante el mantenimiento de estas instalaciones.

También se utiliza para estudiar el estado de estructuras de hormigón armado en las construcciones. Se trata de equipos robustos que pueden instalarse prácticamente en cualquier sitio, un procesamiento de las placas radiográficas muy sencillo y una técnica que es muy confiable; por lo que su uso está muy extendido desde hace años en todo el mundo. Durante la práctica se coloca una fuente de radiación cerca del objeto que será estudiado, y se obtiene una radiografía del mismo. La atenuación diferencial que producen los defectos de las soldaduras o del volumen de la pieza, produce imágenes de los mismos en las placas radiográficas.

Actualmente se utilizan casi exclusivamente fuentes radiactivas encapsuladas de Ir192 y de Co60, si bien aún se siguen utilizando algunas fuentes de Cs137.

En el caso de gammagrafia, el alojamiento blindado de las fuentes varía de acuerdo al radioisótopo y al uso para el que fue construido. Puede ser portátil, o estar montado sobre



ruedas, puede haber sido diseñado para que la fuente no salga del blindaje o para que se la extraiga del mismo manualmente o en forma remota. Las industrias metalúrgicas pesadas, disponen de recintos de irradiación blindados donde se alojan las fuentes y se efectúan las operaciones de gammagrafía de grandes piezas. Los equipos montados sobre ruedas, poseen blindajes muy pesados y suelen tener fuentes de Co60 o de Cs137 de alta actividad. En cambio los equipos portátiles cargan fuentes de Ir192, son de pequeño tamaño, y poseen blindajes de alta densidad (Uranio empobrecido o Tungsteno) y de menor masa que los otros tipos.

La Fig. 6-15 muestra un equipo de gammagrafía portátil típico, también denominado cámara o proyector. Este equipo cumple funciones de contenedor de blindaje y de transporte. El blindaje <sup>4</sup>propriadamente dicho está ubicado en el centro del equipo, y posee un canal que lo atraviesa y por el que se desplaza la fuente cuando debe efectuarse una exposición gammagráfica. Hay diferentes modelos de equipos, algunos poseen canal recto y otros canal curvo, lo que determina el tipo de mecanismo de traba y fijación de la fuente.

El "cable de arrastre" con una unidad de control remoto o dispositivo tipo "manivela" permite mover la fuente para su operación remota. Este cable se sujeta al extremo o "cola" de la fuente, la que asoma desde el equipo en la zona donde se halla el mecanismo de traba de la fuente.

Este cable de arrastre está contenido dentro de un tubo metálico flexible denominado "tubo guía de arrastre" que se compone de varios tramos unidos y que posee conexiones roscadas que deben ser conectadas por un lado al mecanismo de manivela y por el otro a la cola de la fuente. Se utiliza otro tubo metálico flexible también compuesto de varios tramos unidos, denominado "tubo guía de fuente", el que se conecta al extremo opuesto del equipo. Durante la operación, la fuente es arrastrada desde su posición dentro del blindaje hasta el extremo cerrado del tubo guía de fuente, el que ha sido colocado exactamente en el punto donde se debe efectuar la radiografía

La fuente radiactiva está contenida dentro de una cápsula cerrada estanca. La cápsula está montada en un extremo de un conjunto denominado porta-fuente, el que posee un conector

---

<sup>4</sup> Son fuentes encapsuladas que contienen isótopos radioactivos metálicos o también pueden ser sales o gases absorbidos en un bloque de carbón.

Son colocadas en contenedores blindados hechos de plomo o de Uranio para poder manejarla y protegerse contra la exposición a la radiación; las hay con control automático de exposición o manual.

rápido en su otro extremo. En el caso de los equipos de canal curvo, el porta-fuente consiste en la fuente encapsulada unida al conector por medio de un cable flexible de acero, mientras que en los modelos de canal recto la cápsula de la fuente y el conector son parte de un conjunto recto rígido de uranio o tungsteno que actúa como blindaje. El cable de arrastre debe ser enganchado a la fuente mediante un conector rápido "macho", que se conecta al correspondiente conector "hembra" que forma parte del conjunto del porta-fuente. Los equipos poseen un dispositivo que libera la fuente de su traba, solo por la acción voluntaria del operador y únicamente si se ha conectado el cable de arrastre a cola de la fuente, y si además se ha conectado apropiadamente el tubo guía de arrastre al equipo. El dispositivo de traba posee una llave que sólo puede ser accionada si previamente se han cumplido los pasos mencionados. Inversamente, la llave sólo puede ser retirada una vez que la fuente retorna completamente a su posición dentro del canal del blindaje.

Los operadores no deben efectuar reparaciones que modifiquen los dispositivos de traba de fuente en estos equipos, ni deben operar los equipos cuyos dispositivos de seguridad o sus accesorios no estén en condiciones. Las reparaciones inapropiadas, las modificaciones indebidas y el desgaste de los conectores y trabas, suelen ser causa de una parte importante de los accidentes.

Además el personal de operación debe contar con los elementos de radioprotección necesarios: dosímetros personales de lectura directa y diferida, exposímetros de tasas de dosis provistos de alarma audible, monitores de radiación capaces de leer sin saturación tasas de dosis de hasta 100 mSv/h, elementos para delimitar las áreas de trabajo, elementos para manejar situaciones de emergencia, etc.

El diseño de las fuentes encapsuladas debe ser de "Forma Especial" y los contenedores y equipos para el transporte y recambio de las fuentes, deben ser bultos de transporte de tipo B(U). Todos ellos deben contar con el correspondiente certificado emitido por la Autoridad Competente del país donde se fabricaron, y con la correspondiente autorización emitida por la Autoridad Regulatoria.

Los equipos y especialmente las fuentes deben estar señalizados para prevenir accidentes si entran en contacto con el público.

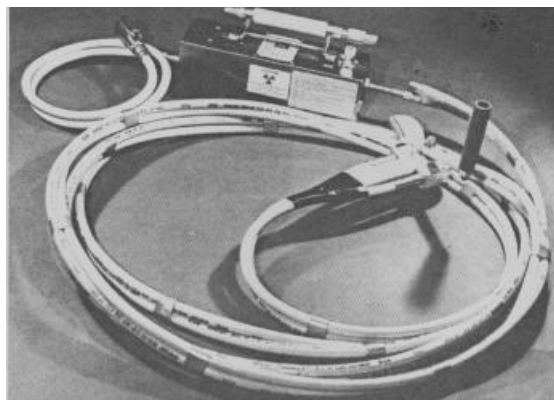
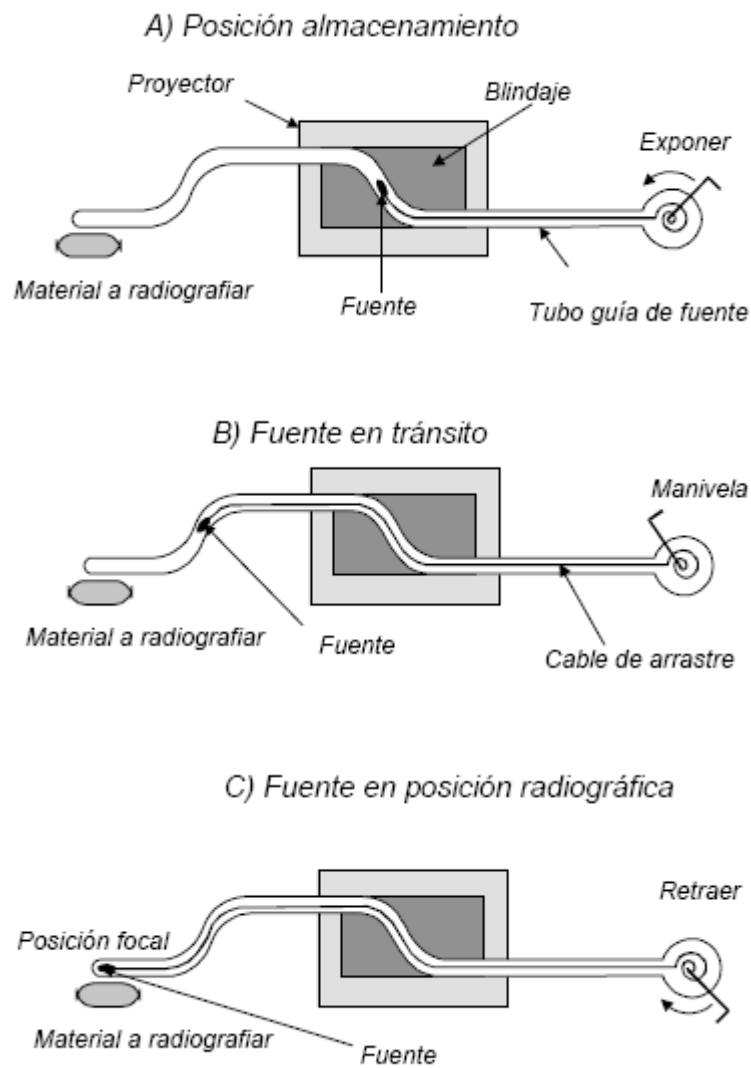


Fig. 6-15: Se muestra un esquema del funcionamiento de un equipo de gammagrafía portátil típico, del tipo cámara o proyector en diferentes secuencias, abajo una fotografía del mismo.

## **6.5 Requisitos y secuencia de la inspección por radiografía industrial.**

Entre los requisitos para realizar un ensayo por radiografía es contar con el equipo mínimo para realizarlo, es decir:

- ☞ Equipos para Gammagrafía o RX.
- ☞ Fuente radiactiva.
- ☞ Equipos de Revelado.
- ☞ Pantallas de plomo.
- ☞ Películas radiográficas, en diferentes tipos y/o tamaños y los reactivos para el revelado.
- ☞ Accesorios para gammagrafía tales como: Letras y números de plomo, penetrómetros de hilo y planchas, de acuerdo con las diferentes normas de aplicación, negatoscopios, densitómetros, carretes y ganchos para revelado.
- ☞ Equipos de seguridad radiológica, medidores de radiación, beepers, alarmas, monitores de área, dosímetros de lectura directa, pinzas de rescate.
- ☞ Accesorios de equipos de gammagrafía mangueras guías y de telemando, pistolas, colimadores de tungsteno, guayas para telemandos, reglas de cálculo, etc.

Posterior a esto el procedimiento que normalmente se debería seguir para obtener una radiografía se describe de la siguiente forma:

Inicialmente, deben conocerse algunas características del material que se va a examinar, como son: tipo del metal, su configuración, el espesor de la pared a ser radiografiada, etc. Todo ello con el fin de seleccionar el radioisótopo o el kilovoltio más adecuado. Una vez establecida la fuente de radiación, se deben calcular las distancias entre ésta, el objeto y la película, para así poder obtener la nitidez deseada. Igualmente, se selecciona la película con ciertas características que permitan una exposición en un tiempo razonable y una calidad de imagen óptima. Esta se coloca dentro de un porta película que sirve como protección para evitar que la luz dañe la emulsión fotográfica, y que además contiene las pantallas intensificadoras que sirven para reducir el tiempo de exposición, mejorando con esto la calidad de la imagen. Este último proceso se efectúa en el laboratorio.

Una vez realizado lo anterior, se procede a poner en práctica las medidas de seguridad radiológica en la zona en la que se va a efectuar la radiografía con el fin de evitar una sobredosis al personal que pueda estar laborando cerca de la zona de inspección.

A continuación, se hace el arreglo para colocar la fuente a la distancia calculada con respecto al objeto y se coloca la película radiográfica del otro lado de éste para registrar la radiación que logre atravesar al material sujeto a inspección.

Esta radiación provoca la impresión de la película radiográfica, que corresponde al negativo de una fotografía. Entre mayor sea la cantidad de radiación que incida sobre la película, más se ennegrecerá ésta. Con el objeto de determinar la sensibilidad y la calidad de una radiografía, se emplean indicadores de calidad de imagen. Al realizar la inspección, los indicadores de calidad de imagen se eligen normalmente de manera que el espesor de éstos represente aproximadamente el 2% del espesor de la parte a inspeccionar y, siempre que sea humanamente posible, se colocarán del lado de la fuente de radiación.

La exposición se realiza, bien sea sacando la cápsula que contiene al radioisótopo o encendiendo al aparato de rayos X; esto se lleva a cabo durante el tiempo previamente calculado para realizar la exposición. Una vez terminada la exposición, se recupera la cápsula o se apaga el instrumento de rayos X y la película se lleva a revelar.

Si se comprueba que la imagen es satisfactoria, entonces se interpreta para conocer qué tipo de indicaciones están presentes; las cuales posteriormente serán evaluadas para conocer su nivel de severidad y su posible efecto en el material que se inspecciona.

## **6.6 Aplicaciones de la radiografía industrial**

Las aplicaciones varían y son diversas, desde el uso médico, investigativo y el industrial. Por lo que nos centraremos en este último pues es el que nos concierne ahora., adicionalmente debemos conocer que la energía de la radiación puede ser absorbida por la materia, también puede hacer fluorescer ciertas sustancias; siendo por todo esto que la técnica se vuelve una herramienta muy importante en casos como:

Cuando se tienen las aplicaciones en las que se mide la atenuación de la radiación, como es el caso de la medición de espesores en procesos de alta temperatura; la medición de niveles de fluidos; la determinación de densidades en procesos de producción continua y la Radiografía Industrial.

Dentro de la radiografía industrial un ensayo no destructivo de tipo físico es utilizado para inspeccionar materiales en busca de discontinuidades macroscópicas y variaciones en su estructura interna. Para la detección, interpretación y evaluación de discontinuidades internas tales como grietas, porosidades, inclusiones metálicas o no metálicas, faltas de fusión etc., en uniones con soldadura, piezas de fundición y piezas forjadas. Al aplicar RI, normalmente se obtiene una imagen de la estructura interna de una pieza o componente, debido a que este método emplea radiación de alta energía, que es capaz de penetrar materiales sólidos, por lo que el propósito principal de este tipo de inspección es la obtención de registros permanentes para el estudio y evaluación de discontinuidades presentes en dicho material.

La radiación electromagnética de onda corta tiene la propiedad de poder penetrar diversos materiales sólidos, por lo que al utilizarla se puede generar una imagen de la estructura interna del material examinado.

Finalmente, resta aclarar que la corta longitud de onda de la radiación que emplea la radiografía le permite penetrar materiales sólidos, que absorben o reflejan la luz visible; lo que da lugar al uso de esta técnica en el control de calidad de productos soldados, fundiciones, forjas, etc.; para la detección de defectos internos microscópicos tales como grietas, socavados, penetración incompleta en la raíz, falta de fusión, etc. El caso de la Radiografía Industrial, como prueba no destructiva, es muy interesante; pues permite asegurar la integridad y confiabilidad de un equipo; además, proporciona información para el desarrollo de mejores técnicas de mantenimiento de un equipo.

Al aplicar RI, normalmente se obtiene una imagen de la estructura interna de una pieza o componente, debido a que este método emplea radiación de alta energía, que es capaz de penetrar materiales sólidos, por lo que el propósito principal de este tipo de inspección es la obtención de registros permanentes para el estudio y evaluación de discontinuidades presentes en dicho material.

En la Fig. 6-16 se muestra lo que se busca en una inspección con esta técnica:

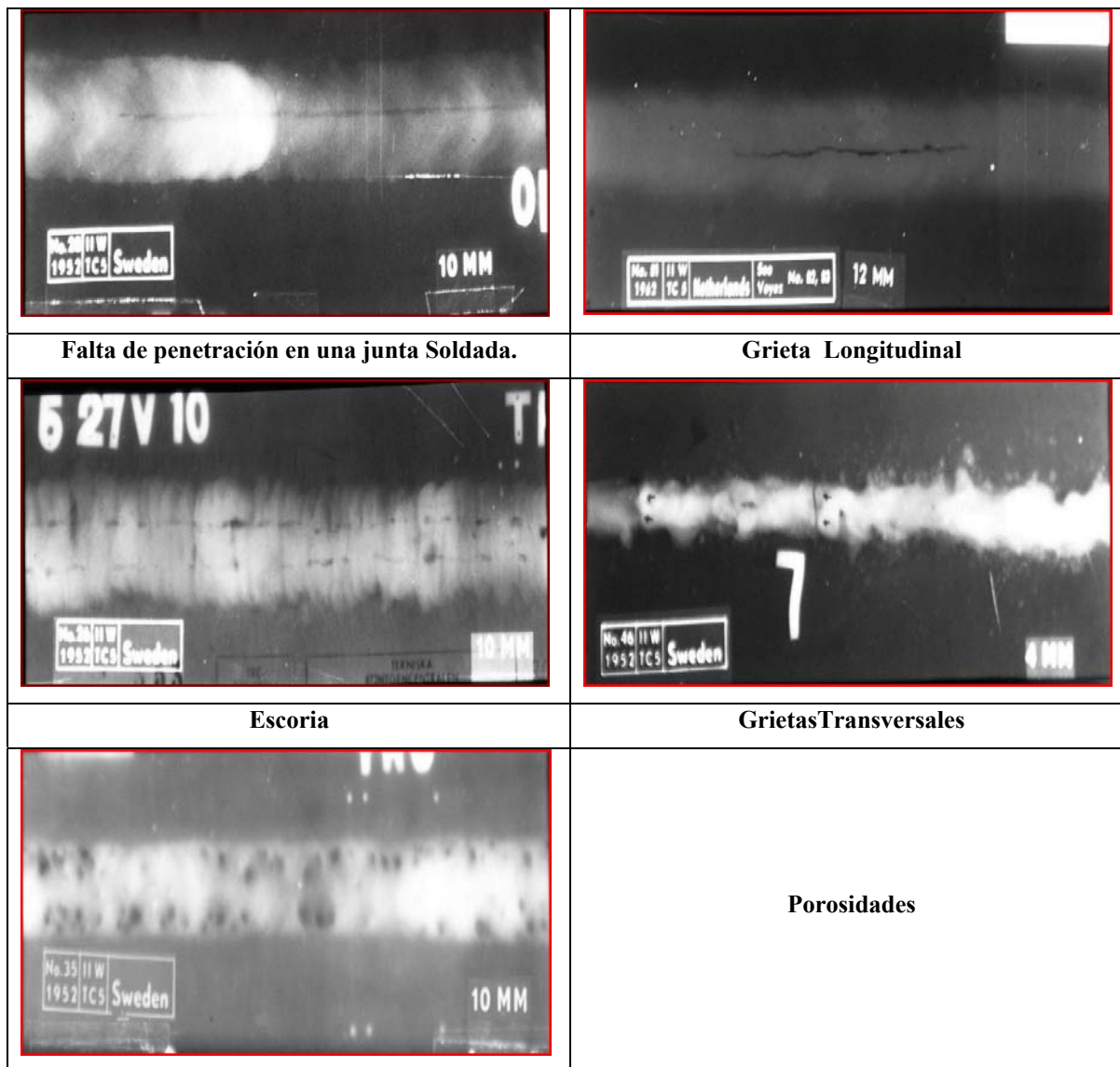


Fig. 6-16: Ejemplos de lo que se busca en una inspección por radiografía industrial.

## 6.7 Ventajas de la radiografía industrial

- ☞ Es un excelente medio de registro de inspección. (Registro permanente)
- ☞ Su uso se extiende a diversos materiales tales como metálicos y no metálicos, ferrosos y no ferrosos.
- ☞ No es afectada por los recubrimientos del material.
- ☞ Alto poder de penetración.
- ☞ Se obtiene una imagen visual del interior del material.
- ☞ Se obtiene un registro permanente de la inspección de un material

- ☞ Descubre los errores de fabricación y ayuda a establecer las acciones correctivas
- ☞ Es más fácil poder identificar el tipo de discontinuidad que se detecta.
- ☞ Revela discontinuidades estructurales y errores de ensamble.

## **6.8 Limitaciones de la radiografía industrial**

- ☞ No es recomendable utilizarla en piezas de geometría complicada o zonas poco accesibles.
- ☞ No debe emplearse cuando la orientación de la radiación sobre el objeto sea inoperante, ya que no es posible obtener una definición correcta.
- ☞ La pieza de inspección debe tener acceso al menos por dos lados.
- ☞ Su empleo requiere el cumplimiento de estrictas medidas de seguridad.
- ☞ Requiere personal altamente capacitado, calificado con experiencia y con una licencia de operación individual vigente para este propósito otorgada por la autoridad regulatoria, con un responsable.
- ☞ Requiere de instalaciones especiales como son: el área de exposición, equipo de seguridad y un cuarto oscuro para el proceso de revelado.
- ☞ Las discontinuidades de tipo laminar no pueden ser detectadas por este método.
- ☞ Se requiere observar medidas de seguridad para la protección contra la radiación.
- ☞ La operación de un equipo debe ser realizada en un área abierta o en un recinto de irradiación que siga procedimientos operativos para tal efecto.
- ☞ Es costosa.
- ☞ Seguridad radiológica
- ☞ La unidad que se emplea para definir el efecto biológico de la radiación en el hombre el Rem.
- ☞ El procesar la radiografía es tardado es decir, revelarla con diferentes químicos para lograr tener un resultado y evaluarla posteriormente; Los resultados de las placas se dan en 6 horas aproximadamente.
- ☞ Necesidad de detener la producción de toda la zona por motivos de salud; no solo el área que se somete a radiación sino todas las demás.

Existen unas observaciones médicas que son importantes y deben considerarse tales como:

- ☞ Los instrumentos empleados para detectar la radiación son los llamados dosímetros y para la medición utiliza las unidades Roetgens, o Rem.



- ☞ La máxima exposición a que debe exponerse una persona es 5 Rem por año.
- ☞ Una persona no debe recibir más de 1.3 Rem durante 3 meses.
- ☞ Una persona no debe recibir más de 100 miliRem durante una semana.
- ☞ Cualquier persona que adquiriera una dosis superior a las limitaciones anteriores debe someterse a tratamiento médico.
- ☞ En el caso de una persona civil, la radiación permisible corresponde a la décima parte de la recibida por un radiólogo.

## **6.9 Procesado de la película**

Una vez radiografiada la pieza y estando preparados los líquidos químicos para el procesado de la película, se procede de la siguiente forma:

Al entrar al cuarto oscuro se encenderá la lámpara de luz ámbar.

Sacar la película del portapelículas y colocarla en el gancho.

Revelado. Sumergir la película en el revelador durante 5 minutos, con el fin de reducir los halogenuros de plata en la película.

Lavado intermedio. Después del revelado, la película se lavará con agua durante 1 minuto.

Fijado. Introducir la película en el fijador durante 10 minutos.

Lavado final. La película se lavará en agua para retirar el fijador.

Secado. Por último se dejará secar la película, ya se al aire libre o algún sistema para este fin.

Para entender cómo la imagen de una radiografía se forma, tenemos que mirar primero a las características de la película en sí. Hay tres partes importantes a una película radiográfica. Estos incluyen la base, la emulsión, y la capa protectora.

### **6.9.1 La base**

Toda película radiográfica consiste en una base para que los otros materiales se apliquen. La película base en general de forma clara, flexible de plástico, como acetato de celulosa. Este plástico es similar a lo que se podría encontrar en un portarretratos. La función principal de la base es para proporcionar apoyo a la emulsión. No es sensible a la radiación, ni tampoco puede grabar una imagen.

La claridad o transparencia de la película de base es una característica importante. La película radiográfica debe ser capaz de transmitir la luz. Una vez que una película ha sido procesada químicamente, está sujeta a interpretación. Esto se llevó a cabo utilizando una película con un dispositivo de alumbrado, que suele tener fuente de luz de gran intensidad.

### **6.9.2 La emulsión**

La película de emulsión de protección y revestimiento compuesto por los otros dos componentes son de y, fundamentalmente, son de hecho el mismo material. Estos materiales se aplican a la película durante el proceso de fabricación y, por lo general adquieren un color amarillo pálido con un aspecto vidrioso. A pesar de que están hechos del mismo material, se ofrecen dos características especiales para la película. Estas características se han separado en la imagen de la capa de emulsión, y la capa protectora.

### **6.9.3 La capa protectora**

La capa protectora tiene la importante función de proteger a los más blandos por debajo de las capas de emulsión. Es simplemente una piel muy delgada de gelatina que busca proteger la película de ralladuras durante la manipulación. Ofrece propiedades muy importantes para los fabricantes de películas, que incluyen el encogimiento (durante el secado que las formas de protección vidrioso capas) y disolver en agua tibia. Se absorben el agua y se hinchan cuando se disuelve en agua fría.

Las capas suaves de revestimiento de la gelatina son conocidas técnicamente como la emulsión. Una emulsión tiene algo en suspensión. Es este material en suspensión que es sensible a la radiación y la forma de imagen latente en la película. Durante la fabricación de la película, bromuro de plata se añade a la solución de gelatina disuelta. Cuando la gelatina se endurece y los cristales de bromuro de plata se mantienen en suspensión en toda la emulsión. Tras la exposición de la película a la radiación, los cristales de bromuro de plata ionizada convertido en distintos grados que forman la imagen latente. Cada grano o cristal de bromuro de plata que se ha convertido en ionizado puede reducirse o desarrollarse para formar un grano de plata metálico negro. Esto es lo que forma la imagen visible en la radiografía. Esta imagen visible se compone de un gran número de cristales de plata cada

uno no solamente esta expuesto de forma individual a la radiación, sino que trabajan juntos como una unidad para formar la imagen.

Una vez que una película ha sido expuesta a la radiación y posee la imagen latente, que requiere el desarrollo químico. El objetivo de desarrollar la película es llevar la imagen latente a cabo a fin de que pueda ser visto. Hay tres soluciones de procesamiento que deben utilizarse para convertir una película expuesta a una radiografía útil. Estos son los reveladores de baño y el fijador. Cada una de estas soluciones es importante en el procesamiento de la imagen a fin de que puedan ser vistos y almacenados durante un período de tiempo.

#### **6.9.4 El proceso de elaboración de película**

1. Para empezar el proceso de convertir la imagen latente en la radiografía a una imagen útil en primer lugar se debe exponer la película al revelador de solución. El revelador tiene por objeto hacer que la imagen sea visible. Una solución química especial para revelar la película es reducir el bromuro de plata de las zonas expuestas a los cristales metálicos de plata negro. Este proceso de revelado es en realidad un paso multi-proceso. Se debe considerar las características de la película durante fabricación, pues son importantes en el proceso de revelado. Se debe tener en cuenta que la capa protectora de la película está hecha de gelatina y es sensible a la temperatura y el agua. El revelador de solución se compone de una combinación de productos químicos que consta de álcali y metol hidroquinona o mezclado con agua. El propósito de álcali es el de penetrar en la capa protectora para reducir la exposición al bromuro de plata, negro óxido metálico.

2. El segundo paso en el proceso de desarrollo es el baño. Este se compone de un ácido acético glacial y el agua. La función de tener el baño es para neutralizar rápidamente cualquier exceso de desarrollo de los cristales de plata. Durante el desarrollo de los cristales de plata se traduce en una imagen radiográfica que es prácticamente imposible de interpretar.

3. El tercer paso en el desarrollo es el fijador. Su función es la de fijar definitivamente la imagen de la película. Este es también un paso multi-proceso. El fijador primero debe

eliminar cualquier cristal de plata no expuesta y, a continuación, endurecer el resto de cristales en la emulsión. Es este proceso que se utiliza para preservar la imagen radiográfica a través del tiempo.

4. Una vez que la película ha sido debidamente revelada, se debe lavar con agua y secarse a fin de que pueda ser examinada visualmente.

## **6.10 Clasificación de la película.**

Es importante conocer la clasificación de las películas a utilizar con el fin de buscar la más indicada para el procedimiento que estemos utilizando y los resultados que deseamos obtener. A continuación la tabla 6-3 muestra los valores de películas comúnmente usadas de acuerdo a la norma ASTM E-94.

<b>TIPO DE PELICULA ASTM CLASE E-94</b>	<b>MEDIDA DE GRANO</b>	<b>VELOCIDAD</b>	<b>CONTRASTE</b>	<b>DUPONT</b>	<b>KODAK</b>	<b>AGFA</b>
CLASE 1	ULTRA FINA	MUY BAJA	ALTO	35	R	-
CLASE 1	ULTRA FINA	BAJA	ALTO	45	M	D2
CLASE 1	MUY FINA	BAJA	ALTO	55	MX	D4
CLASE ½	MUY FINA	MEDIA	ALTO	65	T	D5
CLASE 2	FINA	MEDIA	ALTO	70	AX	D7
CLASE 2	FINA	MEDIA	ALTO	75	CX	-

Tabla 6-3: Valores de películas según norma ASTM E-94.

### **6.10.1 Evaluación de calidad de imagen**

Antes de interpretar y evaluar:

Todas las radiografías deben estar libres de daños mecánicos, químicos u otras manchas que al extenderse no enmascaren o puedan ser confundidas con imágenes de discontinuidades en el área de interés.

Las manchas que deben evitarse son:

### **6.10.1.1 Velado.**

Ralladuras, manchas de agua, manchas de los químicos.

Rasguños, marcas dactilares, polvos marcas de corriente estática.

Indicaciones falsas debido a pantallas defectuosas.

Los parámetros que deben cumplir son:

*Densidad radiográfica:* Para rayos gamma, mínima 2.0 y la máxima es de 4.0.

*Variaciones de densidad:* No deben ser mayores a -15% y + 30% de la densidad medida en el penetrómetro.

*Marcas de localización.*

*Indicadores de calidad de imagen.*

*Sensibilidad radiográfica.*

*Calidad radiográfica*

T = espesor del penetrómetro

Ley de la inversa al cuadrado. La intensidad de la radiación es inversa al cuadrado de la distancia.

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{D_2^2}{D_1^2}$$

Donde:

$I_1$  = Intensidad en el punto 1

$I_2$  = Intensidad en el punto 2

$D_1$  = Distancia en el punto 1

$D_2$  = Distancia en el punto 2

### **Tiempo de exposición.**

Para radiaciones con rayos X, ver Fig. 6-17

La cantidad de Kilovoltios determinan la potencia y la intensidad son determinados por los miliamperios para la exposición.

Distancia focal

Espesor

Tipo de material

La distancia considerada es de 70 cm pero esta puede variar para lo cual se puede emplea la ecuación:

$$\frac{T}{D^2} = \frac{T_1}{D_1^2}$$

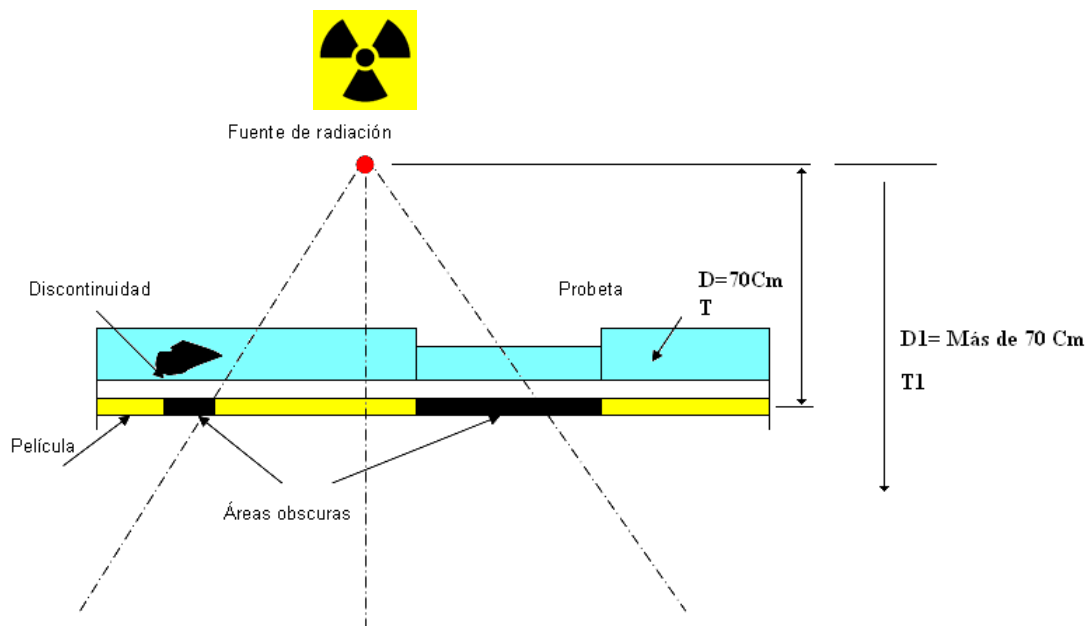
Donde:

$T$  = Tiempo de exposición a una distancia de 70 cm (minutos).

$T_1$  = Tiempo de exposición con distancia diferente de 70 cm (minutos).

$D$  = Distancia de la fuente a la película (70 cm).

$D_1$  = Distancia de la fuente a la película diferente a 70 cm.



**Fig. 6-17: Influencia de los rayos X en el tiempo en la toma de una radiografía.**

## **7.0 Análisis motores eléctricos**

---

### **7.1 Introducción**

Los motores de inducción son la vida de la industria. Cualquier motor crítico para el funcionamiento de una planta debe ser inspeccionado con las herramientas más precisas y confiables.

La monitorización rutinaria del estado de un motor asegura que todos sus elementos funcionarán cuando más lo necesite.

Aunque las medidas de las vibraciones proporcionan información crítica de los problemas físicos de un motor, no siempre es capaz de detectar si el rotor está en perfectas condiciones electromecánicas.

Una visión de la condición y estado de los motores, consiste en detectar problemas tales como:

- ☞ Problemas en barras y anillos de cierre del rotor.
- ☞ Porosidades en la fundición de rotores fundidos.
- ☞ Irregularidades en el entrehierro estáticas y dinámicas.
- ☞ Desequilibrio en el campo magnético.

Esto permite realizar las recomendaciones necesarias para planificar inteligentemente su respectivo mantenimiento y reparación.

Los equipos de Análisis de Motores Eléctricos permiten el diagnóstico de problemas de motores de inducción de corriente alterna obteniéndose los siguientes beneficios:

- ☞ Ahorro valioso de tiempo de producción, ya que se trata de un proceso no invasivo, que no interrumpe la producción.
- ☞ Mayor seguridad, puesto que los ensayos son realizados desde el tablero de control del motor.
- ☞ Información valiosa, ya que los datos obtenidos indican exactamente el fallo, sin necesidad de información histórica.

## **7.2 Técnicas de diagnóstico con el motor fuera de servicio**

Estas técnicas se caracterizan por que se ejecutan cuando la máquina no está en funcionamiento, requiriendo en muchos casos que el motor esté desconectado e incluso parcial o totalmente desmontado. Su realización suele llevarse a cabo durante periodos de revisión programados. La mayoría de estos métodos de diagnóstico están dedicados a observaciones sobre el grado de deterioro del sistema aislante y sobre el estado del núcleo magnético. Entre estos métodos tenemos:

- ☞ Medida del aislamiento a masa: resistencia de aislamiento, índice de polarización, corriente de absorción, capacidad, tangente de delta, factor de pérdidas, ensayos de sobretensión, etc.
- ☞ Aislamiento entre espiras: ensayo de ondas de choque, resistencia de aislamiento, impedancia de secuencia inversa, análisis del circuito eléctrico, estimación de parámetros, etc.
- ☞ Análisis del núcleo magnético: con aplicación del flujo nominal o reducido.
- ☞ Análisis del lubricante de rodamientos: características físicas, contenido de partículas, etc.

Junto con todas estas técnicas, debemos considerar la inspección visual del estado de todos los elementos del motor, lo que en sí mismo constituye el elemento de diagnóstico más poderoso con la máquina parada y desmontada.

### **7.2.1 Comprobación del estado del aislamiento del motor**

El correcto mantenimiento del sistema aislante de una máquina eléctrica constituye un factor clave para asegurar su fiabilidad. La resistencia de aislamiento de los devanados de una máquina eléctrica rotativa es función del tiempo y estado de los materiales utilizados en su constitución, así como de la técnica de conformación del sistema aislante. En general, la resistencia de aislamiento varía proporcionalmente con el espesor del aislamiento y la superficie exterior de los conductores.



El sistema aislante eléctrico (Fig. 7-1), constituido básicamente por un material de buenas características aislantes, térmicas y químicas como la mica, un material flexible que sirve de soporte (papel o fibra de vidrio) y un aglutinante que pegue las diversas capas y que rellene los huecos (por ejemplo: resinas sintéticas), es un medio o material colocado entre conductores a diferentes potenciales (cobre de los devanados y hierro de los núcleos magnéticos, carcasas y otros elementos estructurales) que sólo permite que circule a través de él una pequeña corriente en fase con el voltaje aplicado.

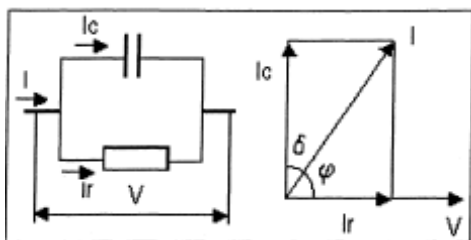


Fig. 7-1: Representación elemental del sistema aislante de una máquina eléctrica rotativa.

El comportamiento eléctrico de este circuito viene representado por el diagrama fasorial de la misma Fig. 7-1. El ángulo  $\delta$  representa el denominado ángulo de pérdidas. Cuanto menor sea este ángulo, mejor será el estado del sistema aislante. Otro término que está asociado con el ángulo de pérdidas es el denominado "factor de pérdidas dieléctricas" definido como  $\epsilon_r \times \text{tg}(\delta)$ , en donde  $\epsilon_r$ , representa la permitividad relativa del sistema aislante.

$$\epsilon_r = \frac{\epsilon}{\epsilon_0}$$

Donde:

$\epsilon$ : permitividad absoluta del aislante.

$\epsilon_0$ : permitividad del aire ( $8,85 \cdot 10^{-12}$  F/m).

La tabla 7-1 muestra el valor de  $\epsilon$ , para diversos materiales aislantes utilizados en máquinas eléctricas.

Material	Permitividad relativa
Aramida (Nomex*)	2,5
Película de poliéster (Mylar*)	3,0
Polietileno	2,3
Película polimida (kaptón*)	3,5
Silicona líquida	2,7

Tabla 7-1: Valores típicos de la permitividad relativa para diversos materiales utilizados en el sistema aislante de las máquinas eléctricas

El valor de la permitividad relativa depende del número de átomos por unidad de volumen y de la capacidad de ser polarizados, es decir, la probabilidad de tener un desplazamiento neto de su carga en la dirección del esfuerzo del voltaje empleado. Este valor no es constante con la frecuencia, temperatura y la humedad. La Fig. 7-2 muestra el fenómeno que ocurre cuando se aplica un escalón de corriente continua entre los terminales de un motor y masa y se mantiene la tensión constante durante un tiempo determinado, para finalmente suprimir la tensión y cortocircuitar los terminales a masa. Tanto al comienzo de este ciclo como en la desconexión, la corriente adopta valores elevados y disminuye rápidamente al principio para después hacerlo más lentamente. En cada caso, la corriente tiene varias componentes que dependen de las características del dieléctrico y la impedancia de la fuente de tensión utilizada.

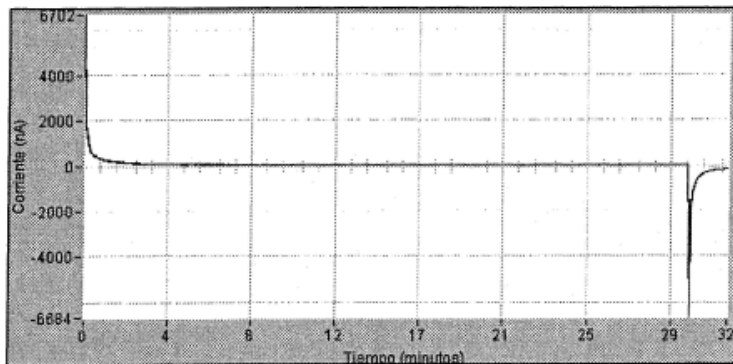


Fig. 7-2: Corriente a través del aislamiento al aplicar un escalón de tensión continua.

La corriente que resulta al aplicar una tensión continua (Fig. 7-3) puede descomponerse en tres componentes: Corriente de carga capacitiva ( $I_{cap}$ ), Corriente de absorción ( $I_{abs}$ ) y Corriente de conducción ( $I_{con}$ ) que puede ser considerada como una corriente de conducción propiamente dicha más una corriente de dispersión.

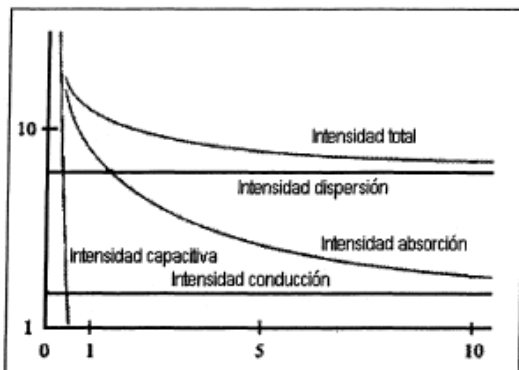


Fig. 7-3: Componentes de la corriente en un dieléctrico al aplicar una tensión continua.

En un primer momento, se establece una corriente capacitiva de valor elevado que decrece exponencialmente para desaparecer de forma casi inmediata. Esta intensidad es la de carga del condensador geométrico que constituye la máquina y no tiene ningún significado destacable en los ensayos de aislamiento. La corriente de absorción o corriente de polarización es una componente transitoria de duración variable, de acuerdo con los materiales que constituyen el sistema aislante, habiéndose observado valores inferiores de partida y un más rápido decrecimiento en los materiales aislantes más modernos. Un modelo sencillo de la corriente de absorción predice un decrecimiento exponencial de la corriente en el tiempo, similar a la descarga de un condensador a través de una resistencia. Se ha encontrado empíricamente que la corriente de absorción decrece de forma inversa con un exponente negativo en el tiempo:

$$I_{abs} = kt^{-n}$$

Donde:

t: Tiempo que transcurre desde que se aplica la tensión.

n: Constante, normalmente comprendida entre 0.5 y 1.

k: Constante característica del dieléctrico y del valor de la tensión aplicada.

El origen de la corriente de absorción es el movimiento extremadamente lento de las impurezas iónicas del material hacia los electrodos entre los que se aplica la tensión continua. En su movimiento, estos iones encuentran una serie de zonas de heterogeneidad propia del material aislante. De esta forma, la corriente de absorción nos informa sobre el estado microscópico del material aislante. Este fenómeno es reversible, de modo que una vez polarizado el dieléctrico, si se ponen los electrodos en cortocircuito, las impurezas iónicas acumuladas junto a los electrodos o en las zonas de discontinuidad se difunden sobre la totalidad del dieléctrico, originando una corriente denominada "corriente de reabsorción" de igual valor y sentido contrario a la corriente de absorción. La magnitud y dependencia en el tiempo de estas corrientes están afectadas por la temperatura, humedad, contaminación y envejecimiento del dieléctrico.

La corriente de conducción adopta un comportamiento asintótico inicial que termina en un valor constante. El valor de la corriente de conducción es una indicación de la concentración iónica y de su movilidad en el material. Estos iones son debidos, más que al propio material del que está constituido el aislante, a electrolitos disueltos, absorbidos o impurezas incluidas en el material. La purificación del dieléctrico elevará, por consiguiente, su conductividad. La presencia de humedad ejerce el efecto contrario, ya que el agua incrementa la concentración iónica. La corriente de conducción tiene una segunda componente de origen externo al material, debido a la presencia de corrientes vagabundas, conocida como "corriente de dispersión" cuyo valor permanece constante en el tiempo. La humedad y la contaminación contribuyen de forma notable a aumentar el valor de esta componente de la corriente como se muestra en la tabla 7-2.

<b>Humedad Relativa (%)</b>	<b>Constante dieléctrica (K)</b>	<b>Factor de disipación</b>
0	3.0	0.0015
30	3.3	0.0017
50	3.5	0.0020
80	3.7	0.0027
100	3.8	0.0035

Tabla 7-2: Factor de disipación y constante dieléctrica del kapton (lámina de 25 µm), en función de la humedad relativa.

### **7.2.2. Ensayos de aislamiento**

A partir de las características básicas que un sistema aislante presenta cuando se aplica una tensión eléctrica entre sus electrodos (terminales de alimentación y carcasa en el caso de una máquina eléctrica rotativa), revisadas de forma sucinta en el apartado anterior, se han desarrollado decenas de métodos de análisis del estado del aislamiento, de acuerdo a cuáles sean las variables observadas o bien combinaciones de las mismas, normalizando valores y relacionando resultados.

A continuación se presentan algunas características de los métodos más comúnmente utilizados, sin pretender en ningún momento ser exhaustivos en el tema. Se consideran sólo algunos de los métodos denominados no destructivos, entendiendo por tales, aquellos realizados con tensiones inferiores a las tensiones de funcionamiento asignadas de la

máquina objeto del ensayo. Se diferencia, a su vez, entre ensayos realizados con corriente alterna y con corriente continua.

### Ensayos de corriente alterna

#### 1. Tangente de delta

El ensayo de la tangente de delta, también denominado de "factor de pérdidas", tiene su aplicación como prueba para determinar la calidad en la fabricación de los bobinados y como indicador del estado del sistema aislante global de las máquinas y es la característica de corriente alterna más universalmente aceptada a tal efecto.

El valor de la tangente de delta de un aislamiento es una medida de las pérdidas dieléctricas del mismo. En un aislamiento perfecto, el valor de  $tg \delta$  no se incrementa conforme aumenta el valor de la tensión aplicada, sin embargo, la presencia de huecos de aire en el aislamiento puede originar, si la tensión de ensayo aplicada es suficiente, el fenómeno de descargas parciales, lo que determina el incremento del factor de pérdidas. El valor de la tensión con el que se inician las descargas parciales debe ser superior al de trabajo de la máquina.

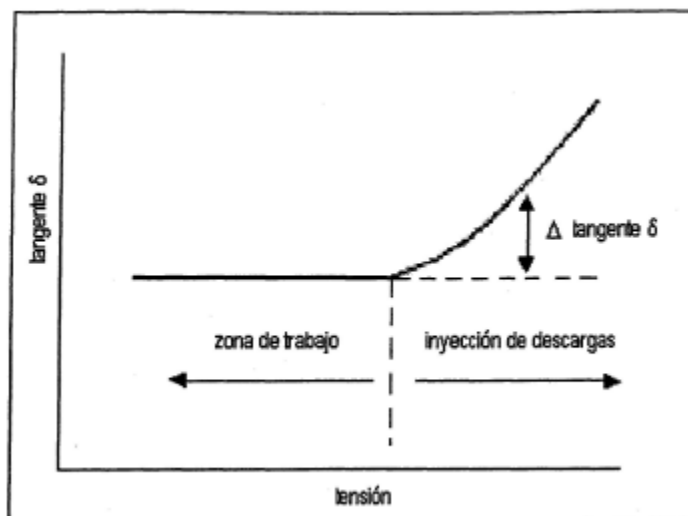


Fig. 7-4: Incremento de la tangente de  $\delta$  y capacidad con la tensión aplicada.

Un ensayo típico de  $tg \delta$  se realiza aplicando valores de la tensión en varios incrementos desde por ejemplo  $0,2E_n$  hasta  $E_n$ , (a veces  $1.2 E_n$ ) entre terminales del motor y masa, midiendo la corriente alterna que circula por el aislamiento mediante equipos adecuados al ensayo que, en esencia, son versiones adaptadas para este propósito de un puente de

Schering. A partir de los resultados obtenidos, los parámetros que suelen utilizarse en el diagnóstico son:

- ☞ Valor de  $\text{tg } \delta$  a  $0,2 E_n$ .
- ☞ Incremento de  $\text{tg } \delta$  entre  $0,2 E_n$  y  $0,6 E_n$ . A veces la mitad de este valor.
- ☞ Evolución de la gráfica de  $\text{tg } \delta$  en función de la tensión aplicada y evaluación con cada salto de  $0,2 E_n$ .

Como norma general, el incremento de la  $\text{tg } \delta$  en un aislamiento epoxi-mica, debe de estar por debajo del 1%, mientras que para un aislamiento de mica compactada con poliéster puede presentar valores muchos más altos y no presentar problemas. El valor de  $\text{tg } \delta$  a tensiones reducidas es representativo del grado de polimerización, pérdidas intrínsecas del material o presencia de humedad y contaminación. No es práctico deducir la condición del aislamiento sobre la base de un único ensayo. Debemos de tener en cuenta que el factor de pérdidas no se relaciona directamente con la zona de peor aislamiento, de modo que una bobina en mal estado puede quedar enmascarada por un número suficiente de bobinas en buenas condiciones.

## **2. Factor de potencia**

El factor de potencia está definido como el coseno del ángulo de fase entre el fasor de la tensión aplicada y de la corriente que circula por el aislamiento, es decir, el  $\cos \phi$ . En un buen dieléctrico se tiene que:

$$90^\circ - \phi = \delta$$

Por esta razón el factor de potencia y la  $\text{tg } \delta$  son frecuentemente intercambiables. La relación entre estos valores trigonométricos es:

$$\cos \phi = \frac{\text{tg } \delta}{\sqrt{1 - (\text{tg } \delta)^2}}$$

Al igual que con el valor de la  $\text{tg } \delta$ , el factor de potencia adopta valores muy pequeños, razón por la cual se proporcionan en forma porcentual, (por ejemplo, un factor de potencia de 0.001 se indica como un 0.1%).

### **3. Ensayo de capacidad**

La capacidad de los devanados frente a masa del motor nos da información de la constante dieléctrica del aislamiento y, a partir de este valor, sobre su estado, contaminación, suciedad y envejecimiento. La capacidad es un valor que suele tomarse en la fabricación del motor y en su mantenimiento. La presencia de contaminación superficial en los devanados provoca que la superficie conductora de la armadura del condensador que forman los conductores, aislante y hierro, se prolongue a la zona en que los devanados salen del núcleo, aumentando su superficie conductora y por lo tanto su capacidad. La capacidad de los devanados está afectada por la frecuencia a que se realiza su medida, comprobándose que, a muy bajas frecuencias, la parte contaminada hace aumentar el valor medido de la capacidad mientras que, a frecuencias altas, este valor se ve muy poco influenciado por la contaminación. La relación entre las capacidades a baja frecuencia (lo que se ha dado en llamar capacidad en corriente continua) y alta frecuencia nos proporciona información sobre la existencia de contaminación en el aislamiento. Estos resultados suelen ser comprobados y contrastados con los resultados de los ensayos del índice de polarización.

### **Ensayos en corriente continua**

Los ensayos del aislamiento con corriente continua en sus diversas variantes se basan en las propiedades que en cada caso tienen las componentes de la corriente que circulan a través del dieléctrico. Se estudian a continuación los ensayos de resistencia de aislamiento, índice de polarización, corriente de absorción, reabsorción y de saltos de tensión.

#### **1. Resistencia de aislamiento**

Consiste en medir o calcular el valor de la resistencia de aislamiento a una tensión determinada (Fig.7-5). Es importante que la tensión aplicada no sea demasiado elevada, lo que provocaría esfuerzos adicionales sobre el sistema aislante. La IEEE Std 43-2000 recomienda utilizar como tensiones de ensayo los valores indicados en la tabla 7-3

Tensión nominal entre fases(V)	Tensión de fase (V)
<1000	500
1001 entre 2500	500 entre 1000
2501 entre 5000	2500 entre 5000
5001 entre 12000	2500 entre 5000
>12000	5000 entre 10000

Tabla 7-3: Tensión de ensayo para máquinas de inducción trifásicas, de acuerdo con el valor de la tensión asignada.

La medida de la resistencia debe realizarse transcurridos 30 ó 60 seg., después de aplicada la tensión continua, siendo más común la medida realizada a los 60seg. La información que proporciona este ensayo está referida especialmente al estado del aislamiento en cuanto a la contaminación superficial (humedad y suciedad). El valor de la resistencia de aislamiento depende de la humedad, especialmente en aislamientos antiguos con características higroscópicas, en los cuales la humedad puede pasar desde la superficie del aislante a su interior, provocando un aumento de la corriente de conducción y disminuyendo significativamente el valor de la resistencia. Las medidas de resistencia de aislamiento deben realizarse siempre por encima del punto de rocío. El valor de la resistencia también es muy dependiente de la temperatura. Así, al contrario de los conductores, en los cuales un aumento de la temperatura provoca el incremento de su resistividad, en los aislantes, al aumentar la temperatura, como consecuencia del incremento de la energía térmica puesta en juego, se liberan cargas adicionales que reducen su resistividad. Esta variación de la temperatura afecta a todas las componentes de la corriente antes identificadas, excepto a la componente capacitiva. El valor medido de la resistencia de aislamiento debe corregirse, normalmente a una base de temperatura común que suele ser 20°C (en Europa) o también a 40°C, lo que permite comparar resultados obtenidos a distintas temperaturas, o en distintas épocas del año. La corrección puede realizarse mediante la ecuación:

$$R_x = K_t R_t$$

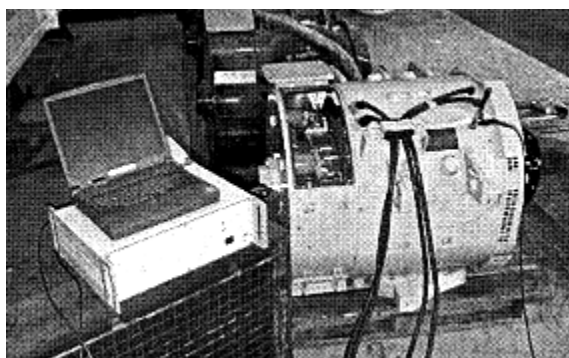


Donde:

$R_t$ : Valor de la resistencia medida en t °C.

$K_t$ : Factor de corrección de la temperatura.

$R_x$ : Resistencia normalizada a x °C (normalmente 20 °C a 40 °C)



**Fig. 7-5: Equipo de medición**

La interpretación de los resultados obtenidos en la medida de la resistencia de aislamiento es compleja, particularmente si no se dispone de medidas previas que permitan analizar la tendencia de este valor o de máquinas similares que faciliten la comparación. La IEEE Std 43-2000 establece unos valores mínimos para la resistencia de aislamiento medidos a 1 minuto después de aplicar la tensión de prueba, corregidos a 40°C. Los valores proporcionados por la tabla 7-4 corresponden a ensayos realizados sobre todas las fases de la máquina frente a masa. Estos valores deben multiplicarse por dos si el ensayo corresponde a la resistencia de aislamiento de una fase contra las otras dos o por tres si se realiza de una única fase contra masa, si se trata de máquinas trifásicas.

<b>Tipo de máquina</b>	<b>Resistencia de aislamiento mínimo (MΩ)</b>
Devanados anteriores a 1970	kV+1
Máquinas de c.a o c.c fabricadas después de 1970 (con devanados preformados)	100
Mayoría de máquinas con bobinas de hilo y bobinas preformadas de tensión nominal < 1kv	5

**Tabla 7-4: Valores mínimos aceptables de la resistencia de aislamiento.**

## 2. Índice de polarización

Se define el índice de polarización (IP) como la relación entre la resistencia de aislamiento medida a 1 minuto y a 10 minutos después de aplicada la tensión continua de prueba.

$$IP = \frac{R_{1\text{min}}}{R_{10\text{min}}} = \frac{I_{10\text{min}}}{I_{1\text{min}}} \approx \frac{I_{\text{cond}} + I_{\text{abs}}}{I_{\text{cond}}} = 1 + \frac{I_{\text{abs}}}{I_{\text{cond}}}$$

El índice de polarización es un valor que nos informa sobre el estado de humedad y limpieza de la máquina, basado en la suposición de que transcurrido un cierto tiempo desde el comienzo del ensayo, la corriente de absorción se habrá anulado. Un valor bajo del índice de polarización nos indicará que existe una corriente alta de conducción o de fugas, originada por suciedad y humedad. En sistemas aislantes modernos, la corriente de absorción puede hacerse próxima a cero en dos o tres minutos desde el comienzo del ensayo. Así, se utiliza en estos casos una variante del índice de polarización que calcula la relación entre las resistencias de aislamiento a 1 minuto y 30 s, después de iniciado el ensayo. Este valor es denominado "índice de absorción" (IA).

Los valores del índice de polarización están muy poco afectados por la temperatura, por lo que salvo en condiciones en que la prueba se haya realizado a elevada temperatura (por encima de los 40°C) no necesitan corrección. Asimismo, en este sentido, debemos considerar que no se produce un cambio de temperatura importante durante el tiempo en que dura el ensayo. El índice de polarización de un aislamiento es un valor adimensional que nos va a permitir hacer comparaciones sobre el estado del aislamiento de máquinas de distintas características (tamaño, potencias, tensiones). La norma CEI 60085.01 indica que, para aislamientos de clase A, el índice de polarización debe ser superior a 1.5, mientras que para aislamientos de clase B, F o H, este valor debe ser superior a 2. No obstante, existen recomendaciones por parte de fabricantes de equipos de medida y usuarios que proporcionan una información más cualitativa a partir del valor obtenido del índice de polarización y de absorción, como la presentada en la tabla 7-5.

Estado de aislamiento	Índice de polarización	Índice de absorción
Mal estado	$IP < 1$	-
Cuestionable	$1 \leq IP < 2$	$1 \leq IA < 1.25$
Aceptable		$1.25 \leq IA < 1.4$
Bueno	$2 \leq IP < 4$	$1.4 \leq IA < 1.6$
Muy bueno	$4 \leq IP$	$1.6 \leq IA$

Tabla 7-5: Valores del índice de polarización y diagnóstico del aislamiento.

En caso de máquinas muy antiguas (más de 20 años), un elevado valor del índice de polarización, por ejemplo del orden de 5 o superior, puede ser síntoma de un aislamiento reseco y quebradizo.

Respecto al ensayo del índice de polarización, debe de tenerse en cuenta que si anteriormente se ha realizado un ensayo de resistencia de aislamiento, con un resultado superior a los 5 GΩ, el valor de la corriente medida es del orden de microamperios. Con estos valores, pequeñas variaciones de la tensión de suministro, de la humedad del ambiente, estabilidad de los contactos y conexiones, etc., pueden afectar significativamente a la medida y, si se utiliza en este caso el valor del índice de polarización como criterio de decisión, puede inducir a errores.

### **3. Corriente de absorción y reabsorción.**

El aislamiento se ve afectado por los esfuerzos térmicos, eléctricos, mecánicos y de medio ambiente, produciéndose en su interior la aparición de productos de oxidación por efecto de las descargas parciales, residuos de polimerización, etc. Al estar la corriente de absorción muy influenciada por la estructura interna del dieléctrico, puede utilizarse como una medida de la degradación interna del aislante. Sin embargo, hay que tener en cuenta que la corriente de absorción aparece junto con la corriente de conducción, lo que nos va a impedir diferenciar ambas corrientes durante la medida. Para evitar este inconveniente se recurre a medir la corriente de reabsorción. La corriente de reabsorción viene determinada por la energía almacenada en el circuito capacitivo durante el periodo de reabsorción y será, por lo tanto, igual a la corriente de absorción pero de sentido contrario. De esta forma,

midiendo la corriente de reabsorción se consigue conocer el valor de la corriente de absorción, ya que durante el periodo de descarga la corriente de conducción se hace cero. El parámetro utilizado para criterios de diagnóstico es el valor de la corriente de reabsorción pasado un minuto desde que se provoca el cortocircuito del aislamiento, habiendo mantenido previamente el escalón de tensión durante 30 minutos, un tiempo considerado suficiente como para que se haya anulado prácticamente el valor de la corriente de absorción, que normalmente será inferior en máquinas con aislamientos modernos. La temperatura es un factor que influye notablemente sobre el valor de la corriente de reabsorción, ya que aumenta la movilidad de las cargas en el interior de la estructura del aislante. Es por lo tanto conveniente referir la medida del índice de absorción a una temperatura base, que suele ser los 20°C, para lo cual puede utilizarse la siguiente ecuación empírica:

$$I_{abs,20} = \frac{I_{abs,t}}{10^{0,022(t-20)}}$$

Donde:

$I_{abs,20}$ : corriente de absorción corregida 20°C.

$I_{abs,t}$ : corriente de absorción a t °C.

Debido al efecto capacitivo, la corriente de absorción será proporcional a la superficie del conductor e inversamente proporcional al espesor del aislante, por lo que para hacer comparables los resultados obtenidos en máquinas diferentes el procedimiento seguido consiste en expresar la corriente de absorción corregida a 20° C y referida a la unidad de capacidad, a la tensión de ensayo y a la unidad de espesor. La tabla 7-6 recoge valores de la corriente de absorción normalizados, utilizados para evaluar el estado de un sistema de aislamiento.

<b>I de reabsorción (mA/V F) a 20<sup>0</sup>C</b>	<b>ESTADO DEL AISLAMIENTO</b>
$I_{rea} < 2.5$	Calidad del aglomerante excelente
$2.5 < I_{rea} \leq 4.5$	Calidad del aglomerante normal
$4.5 < I_{rea} \leq 7$	Calidad del aglomerante regular
$I_{rea} > 7$	Calidad del aglomerante mala

Tabla 7-6: Estado del aglomerante del aislamiento de acuerdo con el valor de la corriente de reabsorción normalizada en tensión y capacidad a 20°C (miliamperios por voltio y faradio).

#### **4. Prueba de saltos de tensión**

Este ensayo constituye una variante de los anteriores y consiste en someter el aislamiento a distintos niveles de tensión y comparar su comportamiento en cada uno de ellos. Se basa en el principio de que un aislamiento ideal producirá lecturas idénticas de la resistencia a todas las tensiones, mientras que un aislamiento en mal estado mostrará una caída en el valor de su resistencia de aislamiento, conforme aumenta la tensión. Funcionalmente, se suele someter el aislamiento a cinco saltos de tensión, manteniendo cada escalón por un tiempo de un minuto. La máxima información de este método de ensayo consiste en, crear una gráfica de resistencia de aislamiento con el tiempo, y comparar los tramos obtenidos a las distintas tensiones. En el caso de un aislamiento en buen estado la estructura será similar, mientras que en aislamientos con problemas, sufrirán deformaciones conforme aumenta el valor de la tensión. Si la resistencia de aislamiento disminuye de forma significativa con el incremento de la tensión, puede ser indicativo de imperfecciones o fracturas del aislante que pueden verse agravadas por la presencia de humedad.

#### **5. Método de análisis del núcleo magnético**

La importancia creciente de la monitorización de defectos en el núcleo magnético es debida al aumento progresivo de la eficiencia de los paquetes magnéticos (mayor la cantidad de potencia por kilogramo de material usado) y la importancia que tiene sobre el resto de elementos de la máquina, de cara a evitar la producción o transmisión de averías (que no se produzcan puntos calientes en el mismo). Fundamentalmente hay dos sistemas para detectar los cortocircuitos entre chapas. El primero basado en aplicar sobre el paquete la práctica totalidad de flujo nominal (entre el 80% y el 100%) y el segundo aplicando aproximadamente sólo el 4% de este valor (método de flujo reducido). El método más comúnmente usado para la detección de fallos en los paquetes magnéticos es el denominado "de puntos calientes", el cual se basa en la excitación del estator de la máquina entre el 80% y el 100 % de su flujo nominal (originando con ello el consiguiente calentamiento del núcleo) y mediante una cámara de termografía infrarroja o bien un termómetro láser establecer aquellas zonas de la superficie del paquete donde se produce un mayor calentamiento. Puede ocurrir que las chapas en cortocircuito no estén en la superficie por lo que el ensayo se debe realizar durante un tiempo suficiente con objeto de permitir

que el calor generado por las chapas en cortocircuito sea transmitido a la superficie. Se trata de un ensayo que conlleva un consumo elevado de energía (puesto que tenemos que llegar a condiciones cercanas a las nominales y mantenerlas para lograr el calentamiento del núcleo), que puede causar daños a la máquina ensayada puesto que durante el ensayo, el sistema normal de refrigeración de la máquina no está en servicio y que exige unas normas de seguridad, puesto que el núcleo alcanza temperaturas peligrosas y las tensiones/corrientes usadas son elevadas. Para evitar todos los inconvenientes anteriormente citados, se emplea un método basado en la inducción electromagnética que las corrientes parásitas creadas por un fallo de aislamiento en el núcleo de la máquina originan en una bobina de ensayo. Este método de ensayo es conocido como "Electromagnetic core imperfection detector" o por su acrónimo "El CID y fue patentado a finales de los años 70 por John Sutton. Para la realización de EL CID, el rotor de la máquina debe ser desmontado y el estator es excitado mediante una bobina de siete espiras que se coloca alrededor del mismo. Mediante un autotransformador se excita el núcleo al 4 % de su flujo nominal. La razón de la excitación al 4 % del flujo nominal es porque todos los datos de diagnóstico y correlaciones entre los datos obtenidos y el nivel de calentamiento están basados en la excitación del núcleo a ese nivel. Una vez excitado el núcleo, las corrientes parásitas originadas por la falta de aislamiento entre chapas magnéticas crean campos magnéticos, que serán detectados mediante el paso de una bobina a través de los dientes del núcleo estatórico. Esta bobina denominada Chattock (llamada así por su inventor), consiste en una bobina flexible de núcleo de aire, que puede ser posicionada para medir la diferencia de potencial magnético entre sus extremos. La habilidad de la bobina para medir la corriente de fallo se basa en la ley de Ampere "la integral de línea cerrada del campo magnético creado alrededor de un conductor es igual a la corriente que pasa a través de dicho conductor".

#### **6. Mantenimiento predictivo de los motores de inducción trifásicos mediante el análisis del circuito del motor.**

El análisis del circuito del motor, también conocido como Motor Circuit Evaluation (MCE), consiste en una serie de técnicas orientadas a determinar el estado del motor trifásico de inducción (y de otros motores de corriente alterna), cuando éste se encuentra desconectado de la red de alimentación. Básicamente y en sus diversas variantes, consiste en determinar

el valor de la resistencia e inductancia de las tres fases del estator, su evolución y posible desequilibrio entre las mismas, valores que se complementan, según los casos y métodos comerciales, con medidas de ángulos de fase, impedancias, valores de resistencia a masa, capacidades, etc. También se utilizan medidas de las tensiones y corrientes de alimentación, para lo cual se conecta el motor a su red de alimentación y se hacen otros análisis tal como desequilibrios de la tensión y corriente de alimentación, análisis espectral de la corriente del estator, etc. En su concepción básica, la evaluación del circuito del motor utiliza equipos que contienen fuentes de alimentación de continua y alterna (perfectamente sinusoidal) de baja tensión y corriente que no dañen al circuito del motor, software de adquisición, almacenamiento de datos, análisis y presentación en pantalla. Los equipos más sofisticados, que brindan mayores posibilidades, contienen también sensores de tensión y corriente, módulos que proporcionan tensiones de hasta 5000 V de corriente continua para las pruebas de aislamiento y algoritmos tal como la Transformada Rápida de Fourier y otros para el análisis de los datos. Las medidas de los parámetros de fase que constituyen el circuito del motor deben ser precisas debido a las pequeñas variaciones a que los mismos están sujetos, admitiéndose órdenes de miliohmios para la resistencia y milihenrios para la inductancia. La primera medida habitual es la de la resistencia de los devanados del estator. Las tres lecturas de resistencias se comparan con los valores iniciales (en caso de que se disponga de los mismos), se calculan las posibles desviaciones y desequilibrios en las mismas. Si los valores obtenidos superan unos valores predeterminados, tendremos síntomas de la existencia de zonas de elevada resistencia u otros problemas. La medida de la inductancia entre fases nos proporciona información sobre la condición en que se encuentran el estator y rotor, al ser esta magnitud medida una combinación de las inductancias propias y mutuas de los devanados que constituyen el circuito del motor. Las faltas en los devanados del estator, como por ejemplo los cortocircuitos entre espiras, tienen un efecto importante sobre la inductancia, al ser este valor para cada devanado proporcional al cuadrado del número de espiras. Tendremos así que un cortocircuito entre espiras significará una disminución de la inductancia de la fase correspondiente. Sin embargo, los cambios en el estado del rotor sólo afectan a la permeabilidad del aire que rodea los devanados del estator. Así, por ejemplo, la ruptura de una barra del rotor producirá una redistribución de la corriente que circula por la jaula, haciendo que la corriente no circula por la barra afectada, lo haga a través de sus

barras colaterales. Este aumento de la corriente en zonas determinadas hace aumentar la densidad de flujo en estas zonas localizadas y con ella la permeabilidad y la inductancia medida. El efecto es justo el contrario al producido por un cortocircuito en los devanados del estator. La evaluación del circuito del motor también utiliza las medidas de las inductancias entre fases del motor y las compara y grafica en diferentes posiciones del rotor. Este ensayo es comercialmente conocido como "Rotor Influence Check" (RIC). Los problemas en la jaula pueden detectarse en las formas de onda de las inductancias en función de la posición del rotor, sobre las formas teóricamente sinusoidales que en caso de avería van a presentar distintas alteraciones, particularmente en tomo a las crestas de onda y en las tres fases medidas si las faltas son importantes o sobre las pendientes de las curvas cuando se producen problemas de menor cantidad. La Fig. 7-6 que a continuación presenta el resultado de un ensayo de inductancia del motor en función de la posición del rotor para un motor con el rotor en buen estado y un rotor con falta en las barras. Cada curva corresponde a la inductancia medida entre cada par de fases, en abscisas se presenta la posición del rotor. Este ensayo se realiza desplazando manualmente el rotor y midiendo la inductancia en una serie de posiciones determinadas.

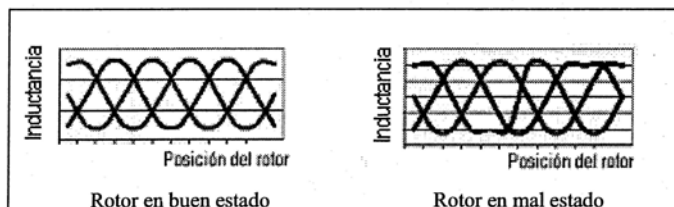


Fig. 7-6: Inductancia del motor en función de la posición del rotor para un motor con el rotor en buen estado y un rotor con faltas en la jaula

### **7.3 Normas IEEE para el diagnóstico de fallas en los aislamientos de máquinas rotativas.**

- 1) Norma IEEE 43-2000: resistencia de aislamiento e índice de polarización (máquinas nuevas y usadas)
- 2) Norma IEEE 95-2002: ensayos de alta tensión continua (máquinas nuevas y usadas)



### 7.3.1. IEEE 43 – Resistencia de aislamiento e índice de polarización (IP)

Este es sin duda el ensayo más ampliamente utilizado para diagnóstico de estatores de motores y generadores. El mismo determina problemas de contaminación en los bobinados. La resistencia de aislación y el índice de polarización se han usado por más de 70 años. Ambos ensayos se realizan con el mismo instrumento, y a la vez. La última revisión de la norma IEEE 43 fue en 1974.

#### A. Teoría

El ensayo de **resistencia de aislación** mide la resistencia de la aislación eléctrica entre los conductores de cobre y el núcleo del estator. Idealmente esta resistencia es infinita, pero en la realidad tiene un valor finito. Generalmente, cuanto menor es el valor de la resistencia, mayor es la probabilidad de que exista un problema.

Por otro lado, la medida del **índice de polarización (IP)** es una variante del ensayo de resistencia de aislación. El IP es la relación entre las medidas de resistencia de aislación a los 10 minutos ( $R_{10}$ ) y a 1 minuto ( $R_1$ ) de aplicada la tensión de ensayo. Es decir:  $IP = R_{10}/R_1$ .

Un IP bajo indica que el bobinado puede estar contaminado con aceite, suciedad, etc. o húmedo. En el ensayo se aplica un valor alto de tensión continua entre los conductores y el núcleo. A continuación se mide la corriente  $I_t$  que circula. La resistencia de aislación ( $R_t$ ) en el instante  $t$  es:  $R_t = V/I_t$ , donde  $V$  es la tensión continua aplicada e  $I_t$  es la corriente total medida luego de  $t$  minutos.

Se hace referencia al tiempo  $t$  porque la corriente generalmente no es constante. Esto es así pues existen cuatro corrientes que circulan al aplicar una tensión continua a la aislación del estator de un motor:

1. **Corriente capacitiva.** Cuando se aplica una tensión continua a un condensador, circula una alta corriente de carga al principio y luego decae exponencialmente. El tamaño del condensador y la resistencia interna de la fuente de continua determinan la velocidad de decaimiento de la corriente. El bobinado de un motor puede tener una capacidad total de 100 nF. La corriente decae a cero en menos de 10 segundos. Esta corriente capacitiva no

brinda ninguna información que sirva para el diagnóstico y por eso se mide la resistencia de aislación una vez que ésta desaparece.

**2. Corriente de conducción.** Esta corriente se debe a los electrones e iones que migran a través de la aislación entre el cobre y el núcleo. Esta corriente circula si la aislación ha absorbido humedad, lo que puede suceder en sistemas de aislación termoplástica antiguas o en aislaciones modernas si han estado expuestas a la acción de agua por tiempo prolongado. Esta corriente también está presente si hay fisuras, cortes, orificios y existe contaminación que permita la circulación de corriente. Esta corriente es constante en el tiempo. En aislaciones modernas esta corriente es nula si no hay fisuras, dado que los electrones e iones no pueden moverse a través de resinas epoxi con mica. Aislaciones antiguas asfálticas con mica tienen corrientes de conducción dado que absorben humedad. Cuando esta corriente es importante es indicación de problemas.

**3. Corriente de fuga superficial.** Esta es una corriente continua constante que circula por la superficie de aislamiento. Está causada por contaminación parcialmente conductora (aceite o humedad junto con polvo, suciedad, cenizas, químicos, etc.). En el caso ideal esta corriente es nula. Si esta corriente es grande es probable que exista un deterioro en la superficie (ver Fig. 7-6).

**4. Corriente de absorción.** Esta corriente se debe a una reorientación de las moléculas polares presentes, al aplicarse un campo eléctrico de continua. Muchos materiales aislantes contienen moléculas polares que tienen un campo eléctrico interno debido a la distribución de los electrones dentro de la molécula. Un ejemplo es el agua. Cuando se aplica un campo eléctrico a través del agua, sus moléculas se alinean. La energía requerida para esta alineación la proporciona la corriente de la fuente de tensión continua. Una vez que las moléculas están todas alineadas la corriente se hace cero. En el asfalto, la mica, el poliéster y la resina epoxi existen moléculas polares. En la práctica se ve que inicialmente la corriente de absorción es grande al principio y decae con el tiempo luego de unos minutos, como si se tratara de un circuito RC. Esta corriente, al igual que la capacitiva, no es indicio de nada bueno ni malo, es simplemente una propiedad de los materiales aislantes.

## Herramientas y técnicas del mantenimiento Predictivo.

La corriente total  $I_t$  es la suma de todas estas corrientes. Por desgracia, ninguna de estas corrientes individuales se puede medir directamente. Las corrientes de interés para el diagnóstico de la aislación son la corriente de fuga y la de conducción. Si sólo se mide  $R_1$  (resistencia a 1 minuto), la corriente de absorción todavía tiene un valor importante. Sin embargo, si la corriente total es suficientemente baja,  $R_1$  puede considerarse satisfactoria. Desafortunadamente, la medida de  $R_1$  exclusivamente, ha demostrado ser poco confiable dado que no se puede tener una tendencia a lo largo de la vida útil de la máquina. Esto se debe a que la resistencia de aislación es fuertemente dependiente de la temperatura. Un aumento de  $10^\circ\text{C}$  en la temperatura puede reducir entre 5 y 10 veces el valor de  $R_1$ . Lo que es peor aún es que el efecto de la temperatura es diferente en los distintos materiales aislantes y depende también de la contaminación. A pesar de que la norma IEEE 43 proporciona fórmulas y tablas de corrección para la temperatura, se admite que no son confiables para extrapolaciones mayores a  $10^\circ\text{C}$ . El resultado es que cada vez que se mide la resistencia de aislamiento  $R_1$  a diferentes temperaturas se obtiene un valor diferente. Esto hace imposible definir un límite para  $R_1$  en un rango de temperaturas amplio. También es imposible observar tendencias a lo largo del tiempo a menos que la medida se haga siempre en las mismas condiciones.

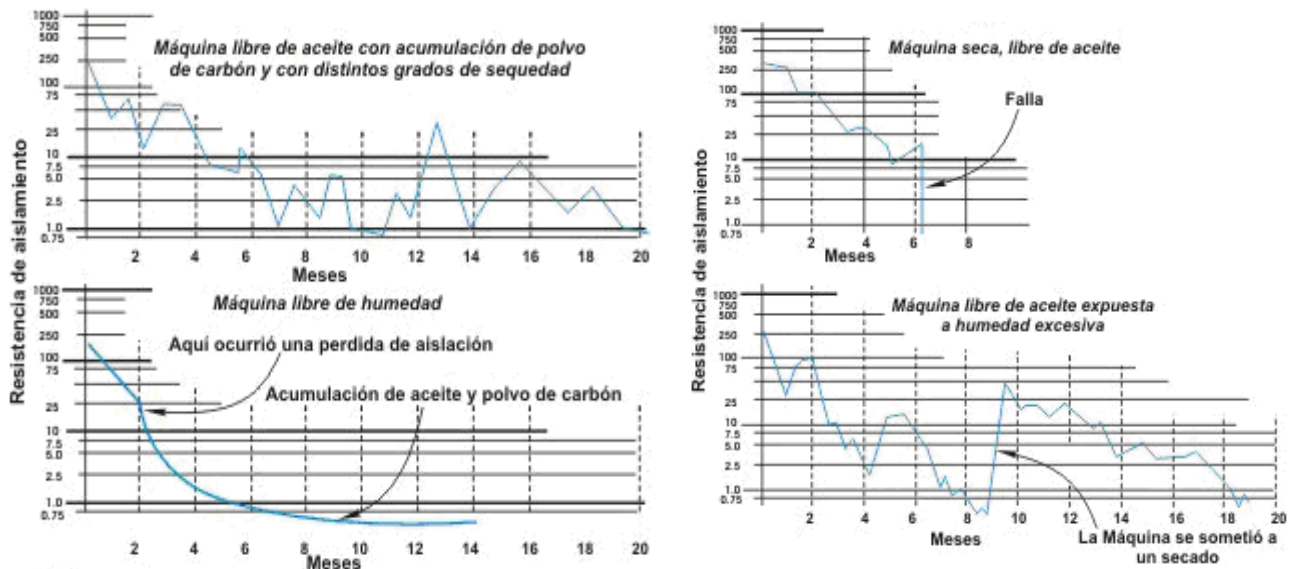


Fig7-6: Comportamiento típico de resistencia de aislamiento en un período de varios meses bajo condiciones variables de operación (curvas trazadas con las lecturas puntuales de un instrumento Megger).

El **índice de polarización (IP)** se desarrolló para hacer la interpretación más independiente de la temperatura. El IP es la relación entre la resistencia de aislación en dos instantes diferentes. Si se asume que  $R_{10}$  y  $R_1$  se miden a la misma temperatura, lo cual es razonable de suponer, el factor de corrección de temperatura es prácticamente el mismo y se cancela al hacer el cociente. Por lo tanto, el **IP es relativamente insensible a la temperatura**. Más aún, el IP nos permite usar la corriente de absorción como una medida para ver si las corrientes de fuga y de conducción son excesivas. Si estas corrientes son mucho mayores que la de absorción, el índice será cercano a uno. La experiencia muestra que si esto sucede hay posibilidades de descargas superficiales (tracking). Por otro lado, si las corrientes de fuga y de conducción son bajas respecto a la de absorción a un minuto, el IP será mayor que 2 y es improbable que exista tracking. Por lo tanto, si podemos ver un decaimiento en la corriente total en el intervalo entre 1 y 10 minutos, esto se debe a la corriente de absorción (dado que la de fuga y la de conducción son constantes) y además la de fuga y la de conducción son menores.

### **B. Método de ensayo**

La resistencia de aislación se mide con una fuente de alta tensión continua y un amperímetro sensible. La regulación de la fuente debe ser muy buena para evitar corrientes capacitivas de carga que circularían por la aislación. El amperímetro debe medir corrientes menores al nanoamperio. Existen varios megóhmetros disponibles comercialmente. Se les conoce generalmente como meggers por el nombre del primer instrumento desarrollado para este fin (Megger es marca registrada). Un megóhmetro tiene una fuente de continua regulada y un amperímetro calibrado para brindar el resultado en Mohm. Los modernos instrumentos pueden aplicar tensiones de hasta 10 kV y medir resistencias de aislación de 100 Gohm. Los resultados de estos ensayos dependerán de la humedad. Si el bobinado está bajo el punto de rocío no hay forma posible de corregir  $R_1$  y  $R_{10}$  por la influencia de la humedad. Si los resultados son malos entonces debe repetirse el ensayo cuando la temperatura del bobinado supere el punto de rocío. Probablemente será necesario calentar el bobinado de alguna manera, incluso durante días, para secar la humedad condensada. La norma IEEE 43-2000 propone realizar ambos ensayos a una temperatura superior al punto de rocío.

La norma IEEE 43-2000 propone tensiones de ensayo superiores a las anteriormente sugeridas dado que a mayores tensiones es más probable encontrar defectos en la aislación. La tensión de ensayo aún está por debajo del valor de pico de la tensión nominal de fase. Es por esto que no se considera el ensayo de resistencia de aislación como de alta tensión. En la tabla 7-7 se sugieren tensiones de ensayo.

<b>Tensión nominal del motor (V)</b>	<b>Tensión continua de ensayo de resistencia de aislación (V)</b>
<100	500
1000-2500	500-1000
2501-5000	1000-2500
5001-12000	2500-5000
>12000	5000-10000

**Tabla 7-7: tensión continua de ensayo sugerida.**

### **C. Interpretación**

Que un resultado sea bueno o malo dependerá de la naturaleza de la aislación. Hasta el 2000, los valores mínimos de resistencia de aislación y los rangos de IP eran prácticamente los mismos para todo tipo de aislación. Sin embargo, en aislaciones modernas y en buen estado, prácticamente no existe corriente de conducción. Es posible encontrar valores de  $R_1$  prácticamente infinitos, mayores que 100 Gohm. Con esos valores es difícil tener cálculos de IP representativos. Esos valores de  $R_1$  no se encuentran en aislaciones previas a 1970. Por lo tanto, el técnico de mantenimiento deberá conocer el material aislante antes de hacer una interpretación de resultados.

La tabla 7-8 resume cómo interpretar los valores de resistencia de aislación e IP. La frontera entre aislaciones antiguas y modernas se fijó en 1970 aunque esto es arbitrario.

Notar en esta tabla:

1. Si  $R_1$  es inferior al mínimo, no se debe someter al bobinado a ningún ensayo de alta tensión o restablecerlo al servicio porque la probabilidad de falla es alta. Obviamente si

los antecedentes indican valores históricamente bajos para una determinada máquina es probable que se pueda retornar al servicio sin problemas.

2. El mínimo para  $R_1$  es corrigiendo a 40°C. Desafortunadamente no es válida una corrección mayor que 10 - 20°C.
3. El mínimo aceptable para  $R_1$  es mucho menor para estatores antiguos que para los nuevos y depende de la clase de tensión.
4. Para motores modernos del tipo *form wound stators*, si se mide una  $R_1$  muy alta (más de 5 Gohm), el IP no aportará ningún dato acerca del estado de la aislación. Es posible ahorrar tiempo de ensayo terminándolo luego del primer minuto de aplicada la tensión.
5. Si la resistencia de aislación o el IP están por debajo del mínimo en un estator moderno, esto indica que existe contaminación o humedad excesiva.
6. Si se obtiene un alto IP en un estator antiguo existe la posibilidad que la aislación haya sufrido un deterioro térmico. Esto sucede porque el deterioro térmico cambia fundamentalmente la naturaleza de la aislación y por consiguiente su corriente de absorción.

<b>Resistencia de aislación mínima</b>	<b>Máquina bajo ensayo</b>
$R_1 \text{ min} = kV+1$	La mayoría de bobinados fabricados antes de 1970, bobinados de campo y otros no descriptos más abajo
$R_1 \text{ min} = 100$	Para bobinados fabricados posteriormente a 1970
$R_1 \text{ min} = 5$	Para bobinados con tensión nominal inferior a 1 kV

<b>Tipo de aislamiento</b>	<b>IP mínimo</b>
Clase A	1.5
Clase B	2.0
Clase F	2.0
Clase H	2.0

**Tabla 7-8: Valores mínimos recomendados para la resistencia de aislación a 40°C (valores en Mohm) e índice de polarización.**

Notas

1- la resistencia de aislación a 1 minuto es la mínima recomendada, en Mohm, a 40 °C, ensayando el bobinado completo de la máquina

2 - kV es la tensión de línea nominal de la máquina en kV eficaces.

En general, los ensayos de resistencia de aislación e IP son medios excelentes para determinar la existencia de contaminación o humedad. Por supuesto que también son útiles para la detección de fallas importantes donde se han producido fisuras o cortes en la aislación. En estatores preformados que usan sistemas de aislación termoplástica, los ensayos también pueden detectar deterioro térmico. Lamentablemente no existe evidencia que indique que estos ensayos permitan detectar barras flojas en ranuras.

### **7.3.2. IEEE 95 – Alta tensión continua**

#### **A. Teoría**

La norma IEEE 95-2002 describe el método de ensayo y sugiere tensiones de ensayo para el ensayo de alta tensión continua. Este ensayo es un ensayo pasa-no pasa que permite detectar problemas importantes que probablemente causen una falla en servicio. La versión anterior de la IEEE 95 fue publicada en 1977. La mayor diferencia entre un ensayo de alterna y uno de continua es la tensión aplicada y la distribución de tensiones en la aislación.

Durante los años 50 se investigó bastante en la relación existente entre las tensiones de ensayo en alterna y continua. Básicamente se llegó a un consenso y se determinó que la tensión de ruptura en continua es 1.7 veces mayor que la tensión eficaz de ruptura en alterna. Esta relación se normalizó en la IEEE 95. Estas investigaciones se basaron en aislaciones antiguas y no se aplica correctamente en aislaciones modernas. Existen pocos trabajos de investigación en aislaciones nuevas en este tema. Uno de los trabajos más importantes indica que esa relación es de 4.3 en aislaciones epoxi-mica. El factor 1.7 no sigue siendo válido pero al no haber estudios completos sobre la repetitividad de esos valores no se ha propuesto ningún cambio del factor en la nueva versión de la IEEE 95.

## **B. Métodos de ensayo**

Existen diversos métodos para el ensayo de alta tensión continua. La mayoría están reflejados en la IEEE 95 y la versión del 2002 muestra una nueva variante de ensayo llamada ensayo con tensión en rampa. Las distintas variantes reducen el riesgo de falla durante el ensayo y dan alguna información útil para diagnóstico. Para todas las variantes de ensayo la decisión crítica es la máxima tensión de ensayo. Se sugiere que la tensión del ensayo de mantenimiento sea el 75% del de aceptación. Las normas NEMA MG1 e IEC 60034 especifican que la tensión continua del ensayo de aceptación sea 1.7 veces la de alterna calculada mediante la fórmula  $2E+1$  kV, donde E es la tensión eficaz nominal de línea.

El ensayo de alta tensión continua no envejece la aislación dado que las descargas parciales difícilmente ocurren en continua. Por lo tanto, si una máquina pasa este ensayo satisfactoriamente, la aislación no sale deteriorada por el ensayo.

### **1. Ensayo convencional**

En el ensayo convencional se conecta al bobinado una fuente de alta tensión continua apropiada. La tensión se aumenta rápidamente hasta el valor de ensayo y se mantiene durante 1 o 5 minutos. Posteriormente se reduce la tensión rápidamente y se conecta el bobinado a tierra. Si la aislación está en buen estado no habrá ningún cambio brusco en la corriente. Si las protecciones de la fuente actúan, seguramente se produjo una perforación en la aislación. Esta es una indicación de falla y la aislación deberá ser reparada. Este ensayo convencional proporciona poca información de diagnóstico aunque es posible medir la corriente al minuto o a los 5 minutos y observar las tendencias a lo largo de la vida útil de la máquina. Un aumento en la corriente puede indicar contaminación.

### **2. Ensayo de alta tensión escalonada (desvío de la ley de Ohm)**

Una variante es usar la misma fuente del ensayo anterior e incrementar la tensión gradualmente en escalones iguales o distintos. Por ejemplo, la tensión continua puede incrementarse en escalones de 1 kV manteniendo cada escalón durante 1 minuto antes de volver a aumentar. Se mide la corriente al final de cada escalón (a esa altura la corriente



capacitiva bajó a cero) y se grafica corriente versus tensión. En el caso ideal, la gráfica será una línea con una leve curvatura hacia arriba. Sin embargo, hay veces en las que la corriente aumenta abruptamente por encima de determinada tensión. Esta puede ser la indicación de que la aislación está próxima a perforarse. El operador debe actuar rápidamente y abortar el ensayo. La experiencia indica que la advertencia es factible si el problema se encuentra en las cabezas de bobina pero no se tiene ninguna advertencia si la falla está en la ranura. Una aplicación cuidadosa de este ensayo permite evitar una falla durante el mismo. Si la tensión a la cual se detectó la inestabilidad es menor que la de servicio, existe un alto riesgo al retornar la máquina al servicio sin hacer reparaciones.

### **3. Ensayo con rampa de tensión**

Una tercera variante del ensayo es llamada rampa de tensión. En este caso la tensión continua se aumenta suave y linealmente a una velocidad constante, generalmente 1 o 2 kV/minuto. No existen escalones discretos de corriente ni tensión. Se grafica automáticamente la corriente versus la tensión. Al aumentar la tensión en forma de rampa, la corriente capacitiva es una corriente constante que puede desprejarse, lo que no se podía hacer en el ensayo escalonado. La principal ventaja es que es el método más sensible para detectar cuándo se produce una inestabilidad, dado que la corriente de carga capacitiva no cambia con el tiempo. Por consiguiente, este ensayo es el que mejor permite al operador evitar una perforación.

### **C. Interpretación**

Fundamentalmente el ensayo de alta tensión continua no es un ensayo de diagnóstico que indique el estado de la aislación. Más bien es un ensayo pasa-no pasa, donde la aislación está en buen estado si pasa y en condiciones de deterioro importante si falla. Sin embargo, la corriente medida puede dar una indicación cualitativa de la condición. En particular, si la corriente en un determinado escalón de tensión aumenta progresivamente a lo largo de los años, es una indicación de que la resistencia de aislación está disminuyendo y la aislación se está humedeciendo o contaminando. Sin embargo, debe tenerse cuidado al estudiar las tendencias, dado que la corriente es fuertemente dependiente de la temperatura y humedad.

## **8.0 Análisis de aceites**

---

### **8.1 Introducción**

El análisis de aceite consiste en una serie de pruebas de laboratorio que se usan para evaluar la condición de los lubricantes usados o los residuos presentes. Al estudiar los resultados del análisis de residuos, se puede elaborar un diagnóstico sobre la condición de desgaste del equipo y sus componentes. Lo anterior, permite a los encargados del mantenimiento planificar las detenciones y reparaciones con tiempo de anticipación, reduciendo los costos y tiempos de detención involucrados.

Los objetivos por lo que se realiza un análisis de lubricantes son los siguientes:

- ☞ Control de la degradación del lubricante.
- ☞ Monitorear daño mecánico de componentes (desgaste).
- ☞ Control de contaminantes por sólidos, fluidos o gases.
- ☞ Verificar que se está usando el lubricante adecuado.

Entre los análisis que se realizan al aceite se encuentran:

- ☞ Análisis espectrométrico del aceite (SOAP Analysis: Spectrometric Oil Analysis Procedure).
- ☞ Análisis de los residuos en el aceite: ferrografía directa, ferrografía analítica, análisis de astillas (chips).
- ☞ Análisis de la contaminación en los aceites hidráulicos, evaluando mediante diversos procedimientos, la viscosidad, el grado de oxidación y el contenido de cenizas.

Este método asegura que tendremos:

- ☞ Máxima reducción de los costos operativos.
- ☞ Máxima vida útil de los componentes con mínimo desgaste.
- ☞ Máximo aprovechamiento del lubricante utilizado.
- ☞ Mínima generación de efluentes.

En cada muestra se puede conseguir o estudiar los siguientes factores que afectan a una máquina:

***Elementos de desgaste:*** Hierro, Cromo, Molibdeno, Aluminio, Cobre, Estaño, Plomo. Conteo de partículas: Determinación de la limpieza, ferrografía. Contaminantes: Silicio, Sodio, Agua, Combustible, Hollín, Oxidación, Nitración, Sulfatos, Nitratos.

***Aditivos y condiciones del lubricante:*** Magnesio, Calcio, Zinc, Fósforo, Boro, Azufre, Viscosidad.

***Gráficos e historial:*** Para la evaluación de las tendencias a lo largo del tiempo.

De este modo, mediante la implementación de técnicas ampliamente investigadas y experimentadas, y con la utilización de equipos de la más avanzada tecnología, se logrará disminuir drásticamente:

- ☞ Tiempo perdido en producción en razón de desperfectos mecánicos.
- ☞ Desgaste de las máquinas y sus componentes.
- ☞ Horas hombre dedicadas al mantenimiento.
- ☞ Consumo general de lubricantes.

## **8.2 Fundamentos de lubricación.**

### **8.2.1 Las funciones de un lubricante.**

Los lubricantes aparecen de diferentes maneras, en forma de fluido, grasa y sólida, dependiendo de los requerimientos de la aplicación. Los lubricantes pueden proporcionar algunos o todos los siguientes beneficios:

**Reducción de fricción o desgaste.** Los lubricantes reducen fricción por medio de la separación de las superficies en movimiento con una película de fluido que transporta la carga. La fricción genera calor y origina degradación de la superficie en forma de desgaste. Tanto el calor como el desgaste reducen la vida útil de los componentes mecánicos y del lubricante mismo. El grado al cual se separan los componentes depende de los diversos factores, que incluyen carga, velocidad y viscosidad. Generalmente, en contactos deslizantes, la película lubricante proporciona de 2 a 20 micrones de separación entre los

componentes. En donde no se logra alcanzar la película fluida de separación, los lubricantes sólidos o productos químicos reducen la fricción límite en la superficie de contactos de los componentes.

**Control de temperatura.** Los lubricantes fluidos absorben el calor en el punto donde este se genera de tal forma que pueda disiparse naturalmente, o ser removido por un intercambiador de calor u otro sistema de enfriamiento.

**Control de contaminación.** Los lubricantes sirven para aislar los componentes de las máquinas del medio ambiente, deteniendo y haciendo más lento el ingreso de contaminantes como partículas, agua y químicos. De igual manera, los lubricantes fluidos recogen los contaminantes y los transportan al tanque o depósito, en donde puedan asentarse por gravedad o los conducen a un filtro o separador en donde son removidos.

**Prevenir el ataque químico.** Al formar una capa protectora sobre la superficie de los componentes, los lubricantes proporcionan protección contra la herrumbre y la corrosión.

**Transmitir energía.** En sistemas hidráulicos, el fluido es el medio por el cual la energía se transmite para hacer actuar los cilindros, válvulas, motores, etc.

### **8.2.2 Consideraciones del aceite básico.**

Los lubricantes varían de manera significativa de un producto a otro. La tabla 8-1 muestra alguna de las pruebas usadas comúnmente para describir las propiedades de los aceites básicos. Las propiedades del aceite básico de un lubricante, determinan por mucho el desempeño operacional del fluido o grasa lubricante resultante.

**Estas pruebas ayudan a describir características clave de los aceites básicos nuevos.**

<b>Propiedad</b>	<b>Porque es importante</b>	<b>Como se determina</b>	<b>ASTM No.</b>
Viscosidad	Define el grado de viscosidad del aceite básico	Viscosímetro de flujo capilar por gravedad	D445
Índice de viscosidad	Define la relación entre la temperatura y la viscosidad	Variación indexada de la viscosidad entre 40 <sup>0</sup> C y 100 <sup>0</sup> C	D2270
Densidad relativa	Define la densidad del	Hidrómetro	D1298

	aceite con relación al agua		
Punto de inflamación	Define propiedades de volatilidad y flamabilidad de altas temperaturas	Probador de punta de flama, temperatura a la que se obtiene una chispa de flama en la superficie	D92/D93
Punto de fluidez	Define el comportamiento del aceite a bajas temperaturas	Flujo por gravedad en un contenedor de prueba, temperatura a la que se alcanza 22,000 cSt aprox.	D97/IP15

Tabla 8-1: ASTM = American Society of Testing Materials.

La mayoría de los básicos son aceites minerales, lo que significa que son producidos a partir del petróleo crudo utilizando diferentes procesos de refinación. Usualmente, la refinación comienza con la destilación en fracciones donde las moléculas son seleccionadas de acuerdo con su tamaño y tipo al variar la temperatura y la presión (vacío). Luego, se puede aplicar otros procesos de refinación, incluyendo:

- ☞ **Extracción por solventes:** El aceite destilado es mezclado con solventes en los que las moléculas aromáticas indeseables se disuelven, permitiendo su separación de las otras moléculas de aceite.
- ☞ **Procesamiento por hidrógeno:** *Hidro-tratamiento moderado*, este proceso a baja presión/baja temperatura, remueve azufre, oxígeno y compuestos de nitrógeno, pero no afecta a los aromáticos. *Hidro-fraccionado severo*, este proceso en alta temperatura/alta presión satura las moléculas aromáticas para convertirlas en moléculas naftéticas y parafínicas más estables, y remover los compuestos polares.
- ☞ **Refinación por ácidos:** los compuestos no saturados son removidos utilizando ácidos sulfúricos, dejando un lodo ácido que posteriormente es removido y neutralizado.
- ☞ **Refinación por arcilla:** utilizando arcillas especiales, se remueven las moléculas no saturadas altamente reactivas.

- ☞ **Desparafinado catalítico o por solventes:** después de la refinación por solventes, las ceras se remueven del aceite parafínico utilizando solventes o se convierten en hidrocarburos de cadenas más cortas usando catalizadores especiales.

Los aceites básicos minerales lubricantes son combinaciones de millones de moléculas diferentes de hidrocarburos. Generalmente, los aceites lubricantes se producen a partir de aceites básicos parafínicos. Ocasionalmente, se utilizan aceites nafténicos para ciertas aplicaciones especiales, especialmente donde se importante la fluidez a baja temperatura. En la tabla 8-2 se comparan algunas propiedades específicas de los aceites básicos. El básico aromático solo se presenta con fines de comparación, pero generalmente no se recomienda en la formulación de aceites lubricantes.

Propiedad	Método ASTM	Aceite Parafínico	Aceite Nafténico	Aceite Aromático
Viscosidad (cSt) @ 40°C	D445	40	40	36
Viscosidad (cSt) @ 100°C	D445	6.2	5	4
Índice de viscosidad	D2270	100	0	-185
Densidad relativa	D287	0.8628	0.9194	0.9826
Punto de inflamación °C	D92	229	174	160
Punto de goteo °C	D97	-15	-30	-24
% Parafínicos	D3238	66%	45%	23%
% Nafténico	D3238	32%	41%	36%
% Aromáticos	D3238	2%	14%	41%

Tabla 8-2: Comparación de propiedades de aceites básicos.

### **Básicos minerales versus básicos sintéticos**

Un pequeño porcentaje de lubricantes en servicio son formulados utilizando aceites básicos sintéticos en lugar de aceites básicos refinados del petróleo crudo. Hay muchos tipos diferentes de aceites sintéticos con propiedades variables. A continuación se muestran algunos beneficios potenciales asociados con el uso de aceites de base sintética:

- ☞ Mejor resistencia a la oxidación
- ☞ Mejor lubricidad

- ☞ Resistencia al fuego
- ☞ Mejor resistencia térmica
- ☞ Intervalos de drenado extendidos

Estos beneficios deben ser comparados con los posibles limitantes, relacionados con el uso de lubricantes sintéticos, para determinar la viabilidad de su uso. Estos factores pueden incluir:

- ☞ Alto costo
- ☞ Incompatibilidad con recubrimientos o sellos
- ☞ Toxicidad potencial
- ☞ Alto costo de disposición
- ☞ Posible incompatibilidad con el aceite mineral

### **8.2.3 Fundamentos de lubricación.**

Idealmente, las superficies de los componentes de la maquinaria están separadas por una película de lubricante. En ausencia de contacto superficie-superficie y asumiendo que el aceite está libre de contaminación, la máquina podría operar con poca fricción y se producirá poco desgaste. Sin embargo, cuando el contacto superficie-superficie es probable, la fricción límite debe reducirse utilizando otros medios. A continuación, se resumen y discuten las principales formas de lubricación:

- ☞ **Lubricación Hidrodinámica:** llamada lubricación de película completa, la lubricación hidrodinámica es la separación de componentes mediante una “cuña” de aceite, la cual se produce hidrodinámicamente (Fig. 8-1). La formación de la película hidrodinámica depende de la superficie geométrica de la máquina, su velocidad, carga y viscosidad del aceite. La viscosidad y la velocidad están relacionadas inversamente a la carga, en la formación de lubricación hidrodinámica. El incremento de la velocidad y/o viscosidad, o la disminución de carga disminuirán el tiempo que toma en alcanzar la separación hidrodinámica y el incremento en el espesor de la película. Así mismo, las disminuciones del componente y la rugosidad de las superficies afectan la facilidad con que se logra la película hidrodinámica. La lubricación hidrodinámica no se alcanza durante el arranque y se pierde al momento

de parar el equipo. Las variaciones repentinas de velocidad y/o carga (cargas de choque) afectan la lubricación hidrodinámica. Ocasionalmente durante el arranque, se hacen esfuerzos por producir una película hidrodinámica usando bombas para “elevar” el eje en el cojinete, para acelerar la velocidad de generación de la película hidrodinámica y reducir el desgaste relacionado con el arranque (lubricación hidrostática).

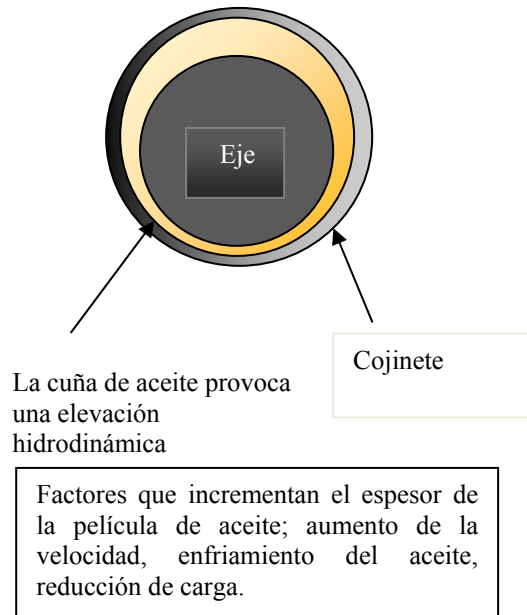


Fig. 8-1: Cuña de aceite.

☞ **Lubricación Elasto-Hidrodinámica (EHD):** la lubricación se forma en contactos rodantes en donde las superficies convergen sobre un punto o una línea, como en rodamientos o la línea de contacto de dos dientes de engrane. Bajo condiciones de presión, en el punto o línea de contacto, hay poca área disponible de contacto. Sin embargo, debido a que todos los materiales son elásticos hasta cierto punto, durante la operación, los metales de los rodamientos se forman para producir la pequeña área en la cual se forma la película hidrodinámica la cual depende de la deformación de los materiales del rodamiento, este régimen de lubricación es llamado *Elasto-Hidrodinámico (EHD)* tabla 8-3. La película de aceite EDH que separa la superficie de los componentes es muy pequeña algunas veces menor de un micrón ( $\mu\text{m}$ ) de espesor. Debido a que la mayoría de la carga de los rodamientos es transferida



momentáneamente a través de un área muy pequeña, la presión en esta área muy alta, en ocasiones cercana a las 500,000 psi. Durante el período de alta presión transitoria, el aceite cambia momentáneamente de líquido a sólido. Una vez que la presión es liberada, el aceite regresa ileso a su estado líquido. Las presiones locales extremas en los contactos de rodamientos, incrementan la importancia de una lubricación efectiva.

<b>Lubricación Elastohidrodinámica</b>
<ul style="list-style-type: none"><li>• Los elementos rodantes y la superficie del rodamiento (pista), se deforman elásticamente para permitir una mayor superficie de contacto.</li></ul>
<ul style="list-style-type: none"><li>• La película de aceite generalmente es menor a 1 micrón. Si se quiere incrementar el espesor de la película de aceite en 2X debe incrementar la viscosidad en 4x.</li></ul>
<ul style="list-style-type: none"><li>• Las altas presiones de contacto (hasta de 500,000 psi) convierten el aceite en sólido.</li></ul>
<ul style="list-style-type: none"><li>• La contaminación de partículas y la humedad, degradan la película lubricante.</li></ul>

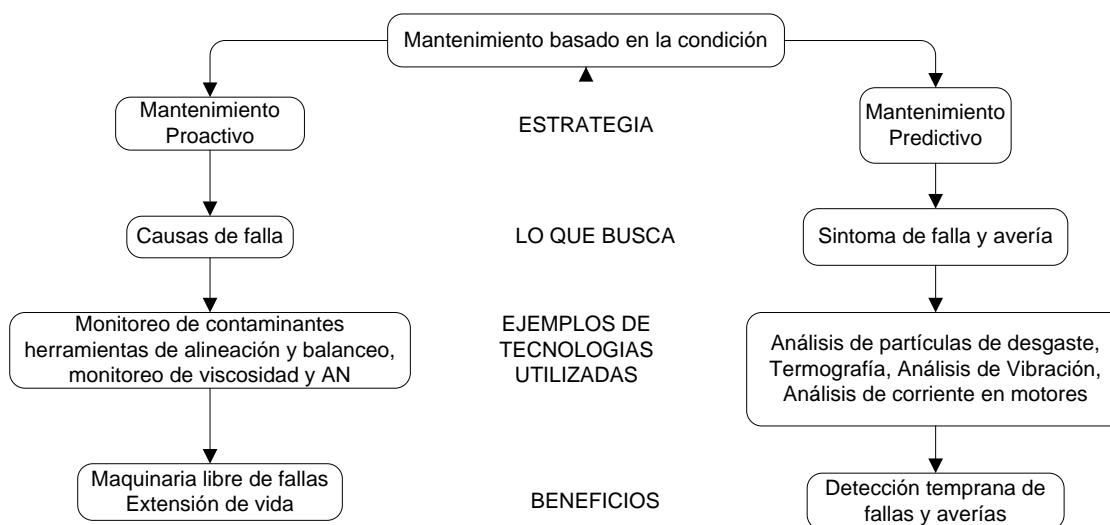
**Tabla 8-3: Régimen de lubricación Elasto-Hidrodinámico.**

- ☞ **Lubricación límite:** este es el régimen de lubricación en donde el control de la fricción depende de las ciertas características químicas del lubricante, ante ciertas condiciones donde las superficies opuestas hacen contacto directamente y no se puede depender de la viscosidad por sí misma para crear una película que las separe. La lubricación límite predomina bajo las siguientes condiciones:
- Cuando el espesor de la aceite no excede la suma de la rugosidad compuesta de la superficie del componente (asperidad de las superficies).
  - Cuando el equipo está sujeto a frecuentes arranque o paros, condiciones de carga de choques, cargas extremadamente altas o bajas velocidades.
  - Los requerimientos de operación sugieren el uso de aceite de baja viscosidad, comprometiendo el control de fricción de algunos componentes del sistema.

La lubricación bajo condiciones límites puede requerir el uso de algunos metales blandos que generen menor fricción de contactos o aditivos que produzcan una reacción química en la superficie de los componentes produciendo baja fricción de contacto, o lubricantes sólidos como el grafito o bisulfuro de molibdeno para reducir la fricción.

### **8.3 Análisis de aceite y mantenimiento basado en condición.**

Mientras que los beneficios de detección de desgaste anormal o envejecimiento del lubricante son importantes y logrados son frecuencia, estos deberían ser considerados de pequeña importancia comparados con el objetivo mucho más gratificante de evitar las fallas (Fig. 8-2)



**Fig. 8-2: Flujograma que ejemplifica un mantenimiento basado en la condición.**

Siempre que se aplica una estrategia de mantenimiento proactivo, son necesarios tres pasos para asegurar que los beneficios se conseguirán. Como el mantenimiento proactivo, por definición, involucra el control y monitoreo continuo de las causas de falla en la maquinaria, el primer paso es fijar un objetivo o estándar, asociado con cada causa de falla. En el análisis de aceite, las causas de falla de mayor importancia, se relaciona con la contaminación del fluido (partícula, humedad, calor, refrigerante, etc.) y la degradación de aditivos.

Sin embargo, el proceso de definición de objetivos precisos y desafiantes (por ejemplo un alto nivel de limpieza) es solo el primer paso. Mantener el control de las condiciones de fluido dentro de estos objetivos debe ser logrado y sostenido. Este es el segundo paso hacia el mantenimiento proactivo y con frecuencia incluye una auditoría de las causas por las que el fluido se contamina y entonces eliminar sistemáticamente esos puntos de entrada. Frecuentemente se requiere mejorar la filtración y el uso de separadores para alcanzar los objetivos de mantenimiento proactivo.

El tercer paso es la acción vital de crear un círculo de retroalimentación que proporciona un programa de análisis de aceite. Cuando ocurre alguna excepción (por ejemplo, resultados anormales por arriba de los objetivos); se pueden implementar rápidamente acciones correctivas. Utilizando el mantenimiento proactivo como estrategia, el control de contaminación se convierte en una actividad disciplinada de monitoreo y de altos niveles de control de limpieza, en lugar de una burda actividad de monitoreo de niveles de tierra.

Cuando los beneficios de extensión de vida del mantenimiento proactivo son acompañados por los beneficios de detección temprana del mantenimiento predictivo, se tiene como resultado un comprensivo programa de mantenimiento basado en condición. Mientras que el mantenimiento proactivo se dirige al control de las causas de falla, el mantenimiento predictivo se dirige a la detección de fallas incipientes de las propiedades del fluido y de los componentes de la máquina, con rodamientos y engranes. La detección temprana de fallas de la máquina y del desgaste anormal, es a lo que frecuentemente se refiere como el dominio exclusivo del análisis de aceite en el campo del mantenimiento.

## **8.4 Control de contaminación.**

La contaminación es el enemigo más importante de los sistemas hidráulicos y mecánicos lubricados. Se introduce desde la atmósfera o se genera en el interior, privando al lubricante y componentes de su preciosa vida. La contaminación, por definición, es cualquier cosa que esté en el aceite y que no debería estar ahí. A continuación se describen los cuatro contaminantes más comunes del aceite.

### **8.4.1 Contaminación por partículas.**

Las partículas abrasivas son responsables de la mayoría del desgaste que provoca fallas mecánicas. La cantidad de daño infringida por las partículas depende en gran manera de su tamaño, forma, dureza y composición química. Las partículas abrasivas deben ser controladas en cualquier sistema que se considera crítico en operación o costos de reparar.

**Por donde entran las partículas.** Muchas partículas se introducen al aceite en aquellos puntos en los cuales la máquina interactúa con el medio ambiente, mientras que algunas otras son generadas internamente. Este es un resumen de las fuentes de ingreso de partículas:

- *Ventilas y respiradores.* Las ventilas abiertas permiten a los contaminantes un paso libre de aceite. Del mismo modo, los respiradores que están fabricados de materiales muy porosos (abiertos), generalmente fallan en controlar efectivamente las partículas del tamaño de los claros dinámicos de la maquinaria que son los que causan más daño al sistema.
- *Sellos de ejes eficientes o dañados y sellos limpiadores (hidráulicos),* permiten el paso de las partículas y fugas.
- *Aceite nuevo.* Contrariamente a la creencia popular de que el aceite está limpio, muchas veces el lubricante nuevo está muy contaminado. Este puede haber sido enviado sucio por el proveedor, haberse contaminado en el almacenamiento o durante el transporte hacia la máquina.
- *Filtros.* Los filtros que ya se han saturado y que se encuentran dañados o defectuosos pueden liberar las partículas atrapadas (desorción) o fallar en la remoción efectiva de partículas.

**Como afectan las partículas al aceite.** Las partículas, especialmente las partículas de metales catalíticos como el cobre, hierro y plomo incrementan la tasa a la cual ocurre la oxidación. Las partículas también despojan al aceite de sus aditivos polares, incluyendo a sus aditivos anti desgaste, aditivos extrema presión, inhibidores de corrosión y dispersantes.

De igual manera, muchas partículas en suspensión estable pueden causar incremento en la viscosidad del aceite.

**Como afectan las partículas a la máquina.** Las partículas abrasivas son las responsables de la mayoría del desgaste que conduce a la falla mecánica de los componentes. Bajo condiciones de aislamiento, las partículas de tamaño de los espacios dinámicos de la maquinaria entran a la película de aceite que hay entre las superficies y cortan material tal y como un torno corta el metal. Bajo condiciones de contacto rodante, las partículas transfieren de manera concentrada la carga, entre las dos superficies en movimiento relativo, dando como resultado fatiga superficie, picado (pitting) y lascas (spalling). El aceite contaminado por partículas que viaja a altas velocidades también puede causar desgaste erosivo.

**Control de la contaminación por partículas.** Idealmente la entrada de partículas debe estar restringida en aquellos puntos en donde puede ingresar. Sin embargo, para alcanzar los modernos objetivos de control de contaminación la mayoría de las máquinas requieren filtración.

Existen una gran cantidad disponible de medidas filtrantes y mecanismos de separación para la remoción de partículas. El desempeño de estos dispositivos generalmente es evaluado de acuerdo a los siguientes criterios de desempeño:

- ☞ **Estabilidad del filtro.** ¿Qué tan estable es el desempeño del filtro a través del tiempo? Un desempeño inestable del filtro equivale a un control de contaminación no confiable. Existen muchos factores que influyen en la inestabilidad del filtro, incluyendo variación de la temperatura, arranque en frío, variación en la presión y vibración mecánica. El tamaño, diseño y construcción del filtro también influye en su estabilidad.
- ☞ **Capacidad del filtro.** Es la cantidad de contaminante de prueba que el filtro puede remover, generalmente en granos.
- ☞ **Eficiencia del filtro.** ¿Qué tan efectivo realiza el filtro la remoción de partículas de un tamaño dado? Esta es información importante para evaluar la capacidad del filtro y conocer si puede cumplir con los requerimientos de nivel de limpieza de la máquina.

También se requiere para evaluar el costo total que implica filtrar el aceite. Existen numerosas pruebas el desempeño de los filtros, pero la más común es la prueba Multipaso de acuerdo al estándar ISO 16889.

**Opciones de separación de partículas.** Las siguientes técnicas están entre las opciones disponibles para la remoción de partículas del aceite:

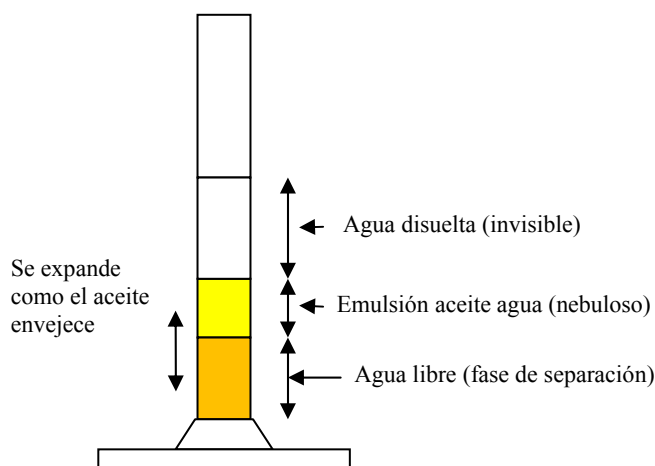
- ☞ ***Filtros de medio filtrante de fibra de celulosa.*** Disponibles en configuración de cartucho o enrosables (sellados), estos filtros están manufacturados con una media plisada hecha de papel (pulpa de madera). Generalmente son efectivos para remover partículas grandes, pero con frecuencia fallan en la remoción de partículas pequeñas (sedimentos). El papel está sujeto a daños causados por aguas y altas temperaturas.
- ☞ ***Filtros de medio filtrante de micro-fibra de vidrio.*** También disponible en configuración de cartucho y sellados, el desempeño de los filtros con media filtrante de micro-fibra de vidrio generalmente es superior a los filtros de fibra de celulosa debido al menor diámetro de sus fibras, mayor densidad de poro y menor promedio de tamaño de poro. Estos filtros pueden remover la mayoría de las partículas grandes y muchas de las partículas más pequeñas del tamaño de los sedimentos del aceite. Ofrecen una estabilidad térmica superior y generalmente no se ven afectados por la presencia de agua.
- ☞ ***Separadores centrífugos.*** Al revolucionar el aceite, las partículas grandes suspendidas pueden separarse eficientemente. Estos separadores son efectivos generalmente en la remoción de partículas grandes de alta densidad, de aceite de menor de menor densidad. Su desempeño disminuye cuando las partículas son pequeñas, de baja densidad o cuando la densidad del aceite es alta.
- ☞ ***Separadores electrostáticos.*** Estos dispositivos capturan las partículas por precipitación electrostática. Creando una celda de alto voltaje (no un flujo de corriente), las partículas cargadas son atraídas a la placa de separación con una carga opuesta. Los separadores electrostáticos ofrecen excelente desempeño en la remoción de partículas del tamaño de los sedimentos y suspensiones insolubles de óxidos y polímeros de carbón que conducen a la formación de barniz en la superficie de los componentes. Su desempeño

depende de las propiedades dieléctricas del aceite y es, por tanto, degradado por la presencia de agua.

### **8.4.2 Contaminación por humedad.**

Con frecuencia el llamado principio enemigo de sistemas hidráulicos y máquinas lubricadas, la contaminación por agua es el segundo contaminante más destructivo. Como se describe en la Fig. 8-3, el agua coexiste con los aceites en los siguientes estados:

☞ **Disuelta.** El aceite disolverá una pequeña cantidad de agua en su química. El volumen del agua que disolverá el aceite depende de su tipo de básico, paquete de aditivos, carga de contaminantes y temperatura. Un aceite básico parafínico nuevo, de alto grado y nivel de pureza, que no tiene aditivos o a penas un inhibidor de oxidación, disolverá muy poco agua antes de alcanzar su punto de saturación. Por supuesto, el punto de saturación de cualquier lubricante es relativo a su temperatura. Según incremente la temperatura, el volumen de agua soluble incrementará. Al disminuir la temperatura, el volumen soluble también disminuirá. Si la temperatura desciende por debajo del punto de condensación, algo del agua disuelta se convertirá en agua libre o emulsionada.



**Fig. 8-3: La contaminación por agua principal enemigo de sistemas hidráulicos y máquinas lubricadas.**

- ☞ **Emulsionada.** Cuando el agua libre (no disuelta) está sujeta a condiciones de corte, presentes durante el bombeo o causadas por el batido de los dientes de los engranes o los rodamientos, se fragmenta en pequeños glóbulos que permanecen suspendidos en estado estable en el aceite. Los aditivos, óxidos y contaminantes pueden estimular la emulsión estable de agua en aceite. El agua emulsionada produce turbiedad, nebulosidad o apariencia lechosa dependiendo del volumen atrapado.
- ☞ **Libre.** El agua está libre cuando se separa del aceite debido a la insolubilidad inherente de las dos sustancias y sus diferencias en densidad relativa. En aceites minerales, el agua libre se asentará en el tanque y en el fondo del depósito. Sin embargo, ciertos sintéticos tienen densidades relativas superiores a la del agua, haciéndola flotar sobre ellos.

**Por donde entra el agua.** Como las partículas, el agua entra por aquellos lugares en los que la máquina interactúa con el medio ambiente. Este es un resumen de puntos de ingreso del agua:

- ☞ **Atmósfera.** El agua libre con frecuencia está presente en el ambiente de trabajo de las plantas y flotillas. La lluvia, lavado a presión y fugas en las líneas de enfriamiento son una oportunidad para que el agua ingrese a través de sellos, ventilas, tapas de tanques y con el aceite nuevo.
- ☞ **Condensación.** Las máquinas que operan con paros y arranques frecuentes están sujetas al ingreso de agua condensada. Cuando la temperatura aumenta, el volumen absoluto del agua que el lubricante puede disolver (punto de saturación) se incrementa. Así mismo, al bajar la temperatura, el punto de saturación disminuye y el aceite puede alcanzar el punto de condensación, o el punto en el cual el agua disuelta es liberada del aceite. Cuando la temperatura se incrementa nuevamente, el aceite absorbe más agua y el proceso continúa. El agua también se condensa en los techos y paredes de los tanques y depósitos. El condensado puede gotear en el aceite y asentarse en el fondo del depósito. En motores de combustión interna, una operación en baja temperatura puede condensar el vapor de agua de la combustión. Finalmente el agua puede condensarse en el aceite por ineficiencia en los sellos de vapor en ciertas máquinas.



☞ ***Fuga de refrigerante.*** Los enfriadores fugan con frecuencia debido al desgaste químico o erosivo. Cuando esto sucede, el agua del enfriador se fuga (y el anticongelante si lo hay) directamente en el aceite.

***Cómo afecta el agua al aceite.*** El agua reacciona con algunos aditivos para formar precipitados y algunos sub-productos químicamente agresivos. El agua también actúa como un catalizador que promueve la oxidación, especialmente en presencia de metales reactivos como hierro, cobre y plomo. En los lugares en los que se acumula agua libre en el tanque, los microorganismos pueden crecer. Los microbios se alimentan del aceite, lo descomponen para formar ácidos que promueven la oxidación y causan la obstrucción de filtro.

***Cómo afecta el agua a la máquina.*** El agua está en forma libre o emulsionada interfiere la lubricación disminuyendo la resistencia de la película lubricante. La película debilitada por agua vuelve a la máquina más susceptible al desgaste por abrasión, adhesión y fatiga. También, el agua corroe las superficies de hierro y acero e incrementa el potencial corrosivo de los ácidos que atacan los metales del rodamiento.

***Control de la contaminación por agua.*** Una vez que se ha detectado, debe investigarse el origen de ingreso de agua. Si las propiedades físicas y químicas del aceite no están dañadas, el agua puede removerse y dejar el aceite en condiciones de servicio. Los métodos de remoción incluyen:

☞ ***Tanques de asentamiento.*** Aunque los resultados varían, dependiendo de las diferencias en densidad relativa y viscosidad del aceite, el agua libre puede removerse del aceite proporcionado un buen espacio y condiciones para su asentamiento y permitiendo el tiempo suficiente para la separación. Ocasionalmente, se puede utilizar calentadores para acelerar la separación. Este método no puede remover agua disuelta o agua emulsionada.

☞ ***Separadores centrífugos.*** El proceso de asentamiento puede acelerarse cuando se incrementan las fuerzas de gravedad usando un centrífugo o generador vórtex. Aunque la separación centrífuga es más efectiva que la separación por

gravedad, tampoco puede remover agua disuelta o emulsiones muy aceptables de agua en el aceite.

- ☞ **Destilación por vacío.** El agua puede evaporarse fácilmente cuando su temperatura alcanza 100<sup>0</sup>C, pero la exposición a altas temperaturas causa estrés térmico y oxidación en el aceite. Los dispositivos de destilación deshidratan el aceite sin dañarlo sustancialmente, aumentando de forma moderada la temperatura y produciendo vacío para reducir el punto de ebullición del agua.
- ☞ **Filtros poliméricos.** Estos filtros se ven como filtros convencionales tipo cartucho o desechables, pero utilizan un medio filtrante que está impregnado como un polímero súper absorbente (Fig. 8-4). El polímero absorbe agua libre y emulsionada y forma un gel que se mantiene firmemente sujeto en el medio filtrante.

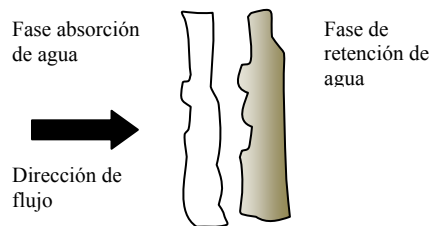


Fig. 8-4: Medio filtrante impregnado con un filtro adsorbente.

### 8.4.3 Contaminación por combustible.

La contaminación por combustible ocurre principalmente en aplicaciones de motores automotrices. La mayoría de los aceites de motor acumula cierta dilución de combustible durante la operación. El cambio de aceite demasiado extendido, operación inadecuada o un mal funcionamiento puede llevar a una acumulación de combustible en el lubricante.

**Por donde entra.** El combustible se introduce al cárter en forma de residuos de combustión junto con los gases y por fugas. La fuga de gases (también conocida como “Blow by”), sucede debido a combustión incompleta o ineficiente ocasionada por una o más de las siguientes causas:

- ☞ Excesiva marcha en vacío
- ☞ Conducir un punto muerto (neutro)
- ☞ Patrones de inyección defectuosos en aspersión o goteo
- ☞ Relación aire/combustible inadecuada

***Su efecto en el aceite.*** La dilución por combustible reduce sustancialmente el desempeño del lubricante de las siguientes maneras:

- ☞ ***Oxidación prematura.*** Las moléculas de combustible se oxidan muy fácilmente. Su oxidación en el lubricante producen sub-productos reactivos que atacan los hidrocarburos más estables del lubricante provocando una reacción en cadena de falla oxidativa.
- ☞ ***Pérdida de viscosidad.*** El combustible, siendo miscible con el aceite, ocasiona una disminución de su viscosidad.
- ☞ ***Dilución de aditivos.*** El combustible no lleva ningún aditivo. Por ello, los aditivos de los lubricantes son diluidos promocionalmente.
- ☞ ***Acumulación por azufre.*** El azufre que proviene de algunos combustibles, como el diesel, incrementa el riesgo de corrosión.

***Su efecto en la máquina.*** La dilución por combustible perjudica a la máquina de las siguientes maneras:

- ☞ ***Incremento del desgaste.*** La pérdida de viscosidad y dilución de los aditivos anti-desgaste se conjugan para aumentar la tasa de desgaste mecánico.
- ☞ ***Incremento de corrosión.*** El ácido sulfúrico y la oxidación inducida por ácidos orgánicos se conjugan para corroer la superficie de los componentes.
- ☞ ***Riesgo de fuego y explosión.*** Altos niveles de dilución por combustible pueden provocar ignición de la mezcla y explotar el motor. Del mismo modo, el incremento de los niveles del lubricante (debido a la adicción del combustible) puede acarrear desbordamiento en el cárter, creando un riesgo de fuego.

***Control de la dilución por combustible.*** La dilución por combustible debe ser detenida en su origen. Una vez que ha sido contaminado con combustible en exceso, debe cambiar el aceite.

#### **8.4.4 Contaminación por hollín.**

El hollín es un sub-producto de la combustión. Los cambios de aceite muy extendidos o la mala combustión provocan acumulación anormal del hollín, la cual tiene efectos dañinos en el lubricante y la máquina. Los nuevos requerimientos EPA para controlar el hollín en la

atmósfera y las emisiones de de óxido nitroso (NO<sub>x</sub>) usando recirculación de gases de escape (EGR) llevarán a un aumento de la carga de hollín en los aceites de motor en los años venideros.

***Por donde se introducen.*** El hollín se introduce al lubricante por la fuga de gases de combustión y es ocasionada por:

- ☞ Baja expresión produce mala combustión, incrementa la tasa a la cual se genera el hollín.
- ☞ Alta relación combustible/aire, causada por obstrucción o restricción del filtro de aire o valores incorrectos en la mezcla.
- ☞ Aire muy frío.
- ☞ Sobrecarga.
- ☞ Excesiva marcha en vacío.

***Su efecto en el aceite.*** El hollín tiene los siguientes efectos en el aceite:

- ☞ ***Pérdida de dispersión.*** Por absorción de las moléculas dispersantes de los aditivos, el desempeño de dispersancia se deteriora rápidamente cuando la ingesta de hollín es alta, llevando a una falla prematura de aceite.
- ☞ ***Perdida de anti-desgaste.*** Las moléculas de aditivo anti-desgaste son absorbidas por las superficies del hollín dejándolas imposibilitadas para proteger los componentes de la máquina.
- ☞ ***Incremento de viscosidad.*** El hollín suspendido en el aceite incrementa su viscosidad. Esto causa incremento de temperatura y reduce el flujo de lubricante a los componentes de la máquina.

***Su efecto en la máquina.*** El hollín perjudica a la máquina de las siguientes maneras:

- ☞ Obstruye filtros
- ☞ Aumenta el desgaste abrasivo
- ☞ Forma depósito, lodo y bloquea venas de lubricación.

***Control de contaminación por hollín.*** El hollín debe ser controlado corrigiendo la causa de su ingreso ya sea controlando la operación o la combustión. Una vez que el hollín ha contaminado el aceite, poco se puede hacer para removerlo. Se sabe de ciertos logros

obtenidos mediante el uso de filtros de flujo lento y filtros centrífugos para la remoción de hollín.

#### **8.4.5 Contaminación por glicol.**

El Glicol con frecuencia contamina los lubricantes de motor y otros sistemas que utilizan mezclas de glicol y agua para enfriamiento. Siempre presente y fluyendo, el glicol es una amenaza constante de fuga hacia el lubricante, especialmente en aplicaciones de motores.

***Por donde se introduce.*** Generalmente, el glicol se introduce al motor por las siguientes razones:

- ☞ Sellos defectuosos
- ☞ Cavitación y erosión (mecánica y electrocinética)
- ☞ Corrosión
- ☞ Daño en el núcleo del enfriador

***Su efecto en el aceite.*** El glicol tienen los siguientes efectos:

- ☞ Formación de gel y emulsiones
- ☞ Aumento de la viscosidad
- ☞ Aumento de la oxidación
- ☞ Formación de ácidos
- ☞ Formación de bolas de aceite

***Su efecto en la máquina.*** El Glicol tiene los siguientes efectos en la máquina:

- ☞ ***Incremento de desgaste.*** Este es causado generalmente por pobre calidad lubricante del aceite, la formación de una emulsión de glicol y falta de lubricante a los componentes debido incremento de viscosidad.
- ☞ ***Incremento de corrosión.*** La corrosión incrementa debido al ambiente ácido que crea el glicol en el lubricante.
- ☞ ***Falta de filtro.*** El glicol obstruye los filtros prematuramente.

***Controlando la contaminación por glicol.*** El glicol debe ser controlado en su punto de ingreso.

No puede ser completamente removido una vez que ha contaminado al aceite excepto con un cambio de aceite. En condiciones severas de contaminación por glicol, el motor o depósito debe ser lavado antes de rellenarse con lubricante.

## **8.5 Métodos de muestreo de aceite**

La toma de muestra es el aspecto más crítico del análisis de aceite. Si no se obtiene una muestra representativa, todos los esfuerzos subsecuentes del análisis de aceite serán anulados. Existen dos objetivos principales para la obtención de una muestra de aceite representativa:

- ☞ **Maximizar la densidad de información.** Dicho simplemente, las muestras deben tomarse de tal forma que obtengamos la mayor cantidad posible de información por mililitro de aceite. Esta información está relacionada con criterios tales como los niveles de limpieza y humedad en el aceite, agotamiento de aditivos y presencia de partículas de desgaste generadas por la máquina.
  
- ☞ **Minimizar la distorsión de información.** Las muestras deben ser extraídas de tal forma que la concentración de información sea uniforme, consistente y representativa. Es importante asegurarse de que la muestra no se contamine durante el proceso de muestreo. Esto puede distorsionar y corromper la información, haciendo difícil distinguir lo que estaba originalmente en el aceite de lo que ha entrado a éste durante el proceso de muestreo.

Para asegurar la buena densidad de información y minimizar la distorsión de la información en el muestreo de aceite, se deben considerar los siguientes factores, cada uno de los cuales es discutido a detalle posteriormente en el capítulo:

- ☞ **Localización del puerto de muestreo.** No todas las ubicaciones de la máquina producen la misma información. Algunos son más ricos en información que otros. Algunas máquinas requieren múltiples puertos de muestreo para responder cuestiones específicas relacionadas con la condición de la máquina, generalmente por excepción.

- ☞ ***Procedimiento de muestreo.*** El procedimiento mediante el cual se extrae la muestra de aceite es crítico en el éxito del análisis de aceite. Los procedimientos de muestreo deben ser documentados y seguidos uniformemente por todos los miembros del equipo de análisis de aceite. Esto asegura la consistencia en la información del análisis de aceite y ayuda a institucionalizar el análisis de aceite dentro de la organización. Esto también proporciona una guía para el éxito para los nuevos miembros en el equipo.
- ☞ ***Dispositivos de muestreo.*** El instrumental usado para extraer la muestra no debe alterar la calidad de la misma. Debe ser fácil de usar, robusto y costo eficiente.
- ☞ ***Botella de muestra.*** Tanto el tipo de botella como su limpieza deben ayudar a asegurar que se obtenga una muestra representativa.

Se aconseja invertir tiempo y recursos en cerciorarse que la maquinaria esté equipada convenientemente con el equipo de muestreo para asegurar que se alcancen las metas y los objetivos de la toma de muestra.

### **8.5.1 Localizaciones de muestreo en sistemas circulatorios**

Hay varias reglas para la localización adecuada de los puertos de muestreo en sistemas circulatorios. Estas reglas no siempre se pueden seguir al pie de la letra debido a varias restricciones en el diseño de la máquina, su aplicación, y medio ambiente de la planta. Sin embargo, la importancia del correcto muestreo de aceite no se puede ignorar tomándose como una prioridad para el análisis de aceite. Siga lo mejor posible las reglas que a continuación se resumen. Estas reglas serán explicadas y discutidas posteriormente en esta sección.

- ☞ ***Turbulencia.*** Las mejores ubicaciones de muestreo son de alta turbulencia. Esto significa que el aceite no está fluyendo en una línea recta, sino que está girando y rotando en la tubería. Las válvulas de muestreo instaladas en ángulos rectos con relación al flujo, en líneas de retorno rectas muy largas, pueden dar como resultado la pérdida de las partículas (que pasan de largo). Básicamente, esto conduce a una reducción sustancial en la concentración de partículas que entran a la botella de muestra. Esto puede evitarse ubicando las válvulas de muestreo en codos y curvas pronunciadas en la línea de flujo.

- ☞ ***Puntos de ingreso.*** En donde sea posible, ubicar los puertos de muestra después de los componentes que se desgastan y donde ingresan partículas y humedad. Las líneas de retorno y líneas de drenado que regresan al tanque proporcionan los niveles más representativos de partículas de desgaste y contaminantes. Una vez que el fluido llega al tanque la información se diluye.
- ☞ ***Filtración.*** Los filtros y separadores son removedores de contaminantes, por lo tanto, pueden eliminar información valiosa de la muestra de aceite. Siempre ubicar las válvulas de muestreo antes de los filtros, separadores, deshidratadores, y tanques de asentamiento, a menos que se esté evaluando específicamente el desempeño del filtro.
- ☞ ***Líneas de drenado.*** En líneas de drenado donde los fluidos se mezclan con el aire, ubicar las válvulas de muestreo en lugares donde el aceite circule y se acumule. En tuberías horizontales, esto será en el lado inferior del tubo. Algunas veces deben instalarse trampas de aceite, por ejemplo del tipo cuello de ganso, para concentrar el aceite en el área del puerto de muestreo.

Debe revisarse primero aquellos sistemas circulatorios donde existan líneas específicas de retorno o líneas de drenado al tanque, lisos sistemas incluyen retornos presurizados-y drenajes tales como los que hay en sistemas hidráulicos y en sistemas de lubricación forzada, en los que también puede haber una bomba de descarga forzando el aceite al tanque. También hay aplicaciones en líneas de drenaje donde el aceite regresa al tanque por la fuerza de gravedad. Algunas veces estas líneas de retorno cuentan con ventilación, como es común en turbinas de vapor, máquinas de papel, etc.

En el caso de los sistemas circulatorios, la ubicación ideal para muestreo es en el múltiple de drenado y en las líneas de retorno (Fig. 8-5). Ello permite tomar una muestra de aceite antes de que regrese al tanque y siempre antes de que el aceite pase a través de un filtro. Si se permite que el aceite regrese al tanque, entonces la información en la muestra se diluirá, potencialmente por miles de litros de fluido en grandes sistemas lubricantes e hidráulicos. El muestreo en las líneas de retorno ayuda a identificar la generación activa de partículas de



desgaste mientras que las partículas en el tanque tienden a acumularse por semanas o meses y pueden no representar con precisión la condición actual de la máquina.

**Líneas de retorno o drenaje**

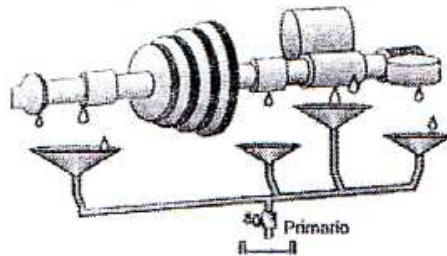


Fig. 8-5: ubicación ideal para muestreo es en el múltiple de drenado y en las líneas de retorno en un sistema circulatorio.

La Fig. 8-6 es un ejemplo de sistema grande de lubricación de aceite que abastece a un conjunto de rodamientos. El aceite baña a los rodamientos a través de un tubo concentrador por gravedad y posteriormente regresa al tanque. Aquí se identifican varias posibles localizaciones de muestreo. Algunas ubicaciones están marcadas con una letra “S”, lo que significa que son localizaciones de muestreo Secundarias.

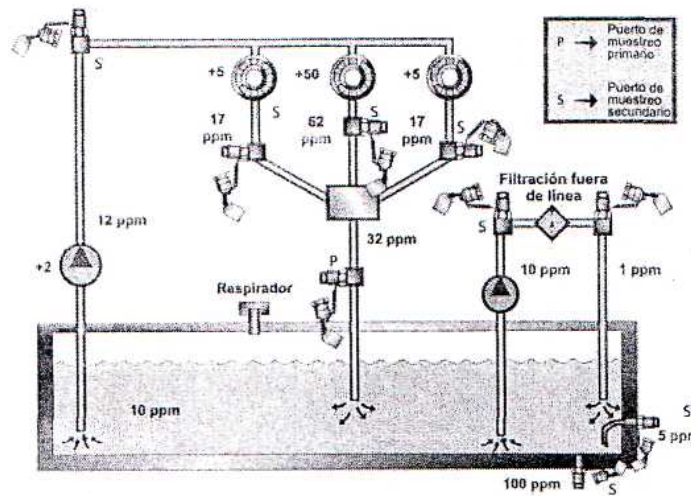


Fig. 8-6: sistema grande de lubricación de aceite que abastece a un conjunto de rodamientos.

La localización primaria, marcada con la letra “P” se encuentra en el concentrador de esta línea de drenado justo antes de que el aceite regrese al tanque. Al tomar la muestra en esta ubicación, se pueden detectar muchos problemas potenciales. Por ejemplo, se puede dar

cuenta de esto desde el puerto de muestreo en la línea de retorno, si los rodamientos están experimentando desgaste anormal, o si hay niveles elevados de humedad, partículas, contaminación del proceso o químicos que hayan sido introducidos al aceite a través de sellos o ventilas. Igualmente, se puede verificar que el aceite cumple con los niveles requeridos de limpieza y humedad. También verifica que la viscosidad y todas las demás propiedades físicas del aceite estén dentro del rango objetivo. Se considera a éste el puerto de muestreo primario porque es representativo del aceite que va a lubricar los rodamientos y también recoge cualquier partícula de desgaste que el rodamiento pudiera añadir al aceite.

Cuando se detecta alguna condición anormal desde el puerto de muestreo primario, el siguiente paso es, por lo general, muestrear desde un puerto secundario para identificar el problema. En este caso, en la Fig. 8-6 están representadas 32 ppm en el punto de muestreo primario (para este ejemplo, suponga que este número representa la cantidad de hierro en el aceite). Esta elevada lectura, le lleva a usar el punto de muestreo secundario para identificar la fuente del incremento en la concentración de hierro. En este ejemplo, cada uno de los rodamientos exteriores está generando 17 ppm, mientras que el rodamiento central está produciendo 62 ppm. El fluido de abasto al sistema muestra sólo 12 ppm. En este ejemplo, es obvio que el rodamiento central está produciendo las partículas de desgaste. Los esfuerzos de diagnóstico pueden enfocarse ahora en ese componente.

En este ejemplo, si hubiéramos dependido completamente de la muestra de aceite del tanque, sólo habríamos observado 10 ppm debido a la dilución en el gran volumen de aceite, el asentamiento de partículas y la presencia del filtro fuera de línea, el cual remueve una gran parte de las partículas de desgaste del aceite.

Igualmente, si tomásemos muestras del fondo del tanque veríamos una concentración muy elevada de lodo y agua y, en este caso, habría 100 ppm de hierro. Por supuesto, esta es información histórica y probablemente no tiene nada que ver con la condición actual de los rodamientos.

En resumen, la línea de drenado proporciona el puerto de muestreo primario. Si ahí hay alguna lectura anormal o una alarma por resultados fuera de límites, deben tomarse muestras

de las líneas de drenado individuales de los rodamientos. También debe obtenerse una muestra en la línea de abasto del fluido. Al comparar estas muestras, se puede determinar cuál es el problema y cómo pudo haberse generado.

La Fig. 8-7 ilustra un sistema hidráulico con un fluido a presión en todas las líneas. Una vez más, el puerto de muestra primario está en la línea de retorno. Pero, en este caso, debido a que hay un filtro en la línea de retorno, la muestra primaria debe tomarse justamente antes de este filtro. Si el filtro está haciendo su trabajo, funciona como un removedor de información. Si se toma una muestra después del filtro, éste puede capturar información crítica acerca de la condición de la máquina antes de que tenga oportunidad de llegar a la botella de muestra. Si el filtro mismo es un problema y se encuentra en derivación, ha colapsado o está inservible, la muestra antes del filtro estará contaminada igualmente que la muestra tomada después del filtro.

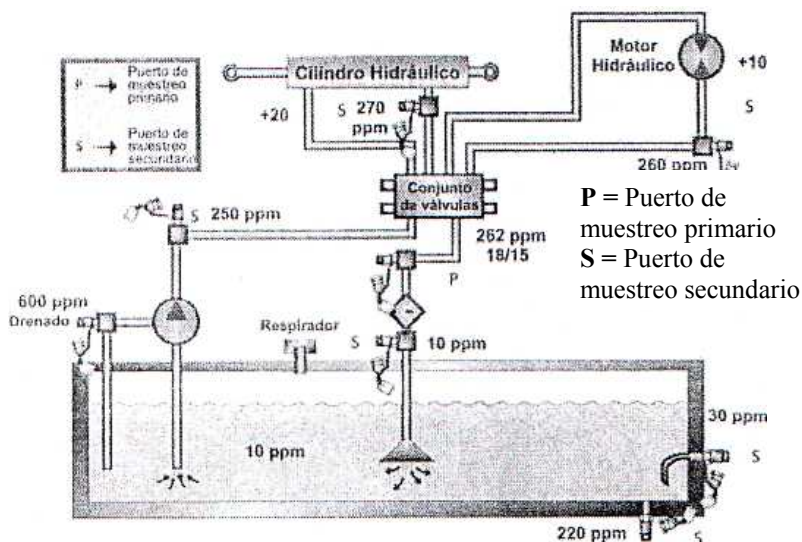


Fig. 8-7: Sistema hidráulico con un fluido a presión en todas las líneas.

En este caso, el puerto de muestreo en la línea de retorno antes del filtro indica 262 ppm de metal de desgaste o contaminantes. Si se toma una muestra en ambas localizaciones secundarias veremos que hay 260 ppm saliendo del motor hidráulico y 270 ppm que proceden del cilindro. Esto sugiere que el material que está entrando al fluido es compartido

por ambos actuadores. Siguiendo el flujo hacia arriba y muestreando después de la bomba, es claro que 250 ppm vienen de la bomba. Esto significa que puede ser un problema con la bomba, o que aceite sucio está siendo suministrado a la bomba desde el tanque. Una muestra tomada del tanque, revela una lectura baja de sólo 10 ppm, confirmando que la bomba es el problema. Una vez localizado el problema, es posible enfocar completamente el diagnóstico y acciones correctivas en la bomba hidráulica.

### **8.5.2 Muestreo en zona viva en sistemas circulatorios**

Cuando se toma una muestra de una línea en un sistema circulatorio, esta se conoce como una muestra en zona viva. Hay algunas cosas que pueden hacerse durante el proceso de muestreo que mejoran la calidad y efectividad de las muestras en zona viva. El siguiente es un resumen de qué debe y qué no debe hacerse.

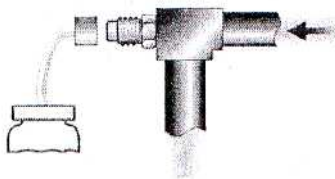
#### **Qué hacer:**

1. Muestrear en zonas turbulentas del sistema, donde el fluido está en movimiento y el aceite está bien mezclado.
2. Muestrear en la parte del equipo donde se hayan completado las funciones primarias, como lubricar un rodamiento o un engrane o donde ha pasado a través de bombas hidráulicas o un actuador.
3. Muestrear los sistemas durante las condiciones típicas de trabajo, en operación y sobre aplicaciones normales. Se debe tratar de no muestrear después de un cambio de aceite, cambio de filtro o en momentos en que el fluido no pudiera presentar condiciones típicas.
4. Donde se requiera, se debe emplear localizaciones secundarias de muestreo para localizar problemas.

#### **Que no hacer:**

1. Muestrear en tuberías sin movimiento, tubos ciegos y tuberías en donde el fluido no está en movimiento o circulante.
2. Muestrear después del filtro o de los separadores.
3. Muestrear cuando la máquina está fría y no ha sido operada o cuando está trabajando sin carga.

4. Muestrear en zonas de flujo laminar (falta de turbulencia en el fluido). La mejor forma de asegurarse que el fluido está turbulento y bien mezclado durante el proceso de muestreo, es tomar la muestra en codos en lugar de en los tramos rectos de las tuberías (Fig. 8-8).



**Fig. 8-8: Muestreo en línea presurizada.**

Cuando se requiere tomar muestras de líneas presurizadas de alimentación a rodamientos, engranes, pistones, compresores, etc., el método de muestreo se simplifica un poco. La Fig. 8-9 muestra cuatro configuraciones diferentes.

- ☞ ***Muestreo por grifo portátil para alta presión.*** La configuración en el extremo superior de la Fig. 8-9 corresponde a una zona de alta presión, en la cual se instaló una válvula de bola o de aguja y el extremo está conectado con una pieza helicoidal de tubo de acero inoxidable. El propósito del tubo es reducir la presión del fluido a un nivel seguro antes de que entre en la botella de muestra.
- ☞ ***Muestreo con válvula de conexión (también conocida como válvula minimes).*** Esta alternativa requiere que se instale una válvula del tipo conectar, de preferencia en un codo. La botella de muestreo tiene un tubo conectado a una sonda en su tapa. La sonda se conecta al puerto conector permitiendo al aceite fluir dentro de la botella. La botella de muestra tiene un orificio de ventilación en la tapa, para que al entrar el fluido en la botella, el aire pueda escapar por ahí. Por seguridad, este método de muestreo requiere bajas presiones (menos de 500 psi).
- ☞ ***Muestreo por válvula de bola.*** Esta configuración requiere la instalación de una válvula de bola en un codo. Al tomar la muestra, la válvula debe abrirse y permitir que se purgue adecuadamente. Se requiere de una mayor purga si el extremo de la válvula no está tapado. Una vez purgada, se retira la tapa de la botella de muestra y

se colecta una muestra del flujo saliente antes de cerrar la válvula. Debe tenerse cuidado de evitar la entrada de contaminación al destapar la botella. Esta técnica no está recomendada para aplicaciones de alta presión.

☞ **Muestreo con válvula de conexión (conector minimess) portátil.** Esta opción requiere la instalación de una válvula tipo conector en la sección hembra de un conector rápido. Este ensamble es portátil. El conector rápido macho está permanentemente fijo a la línea presurizada de la máquina, en el punto de muestreo deseado. Para muestrear, se conecta el acoplamiento rápido hembra al conector macho lijo a la máquina; la sonda de la botella de muestra presiona la válvula tipo conector para inducir el fluido dentro de la botella. En muchos casos ya existen los conectores rápidos en la maquinaria. En caso de líneas con alta presión, siempre utilice una espiral helicoidal descrita anteriormente.

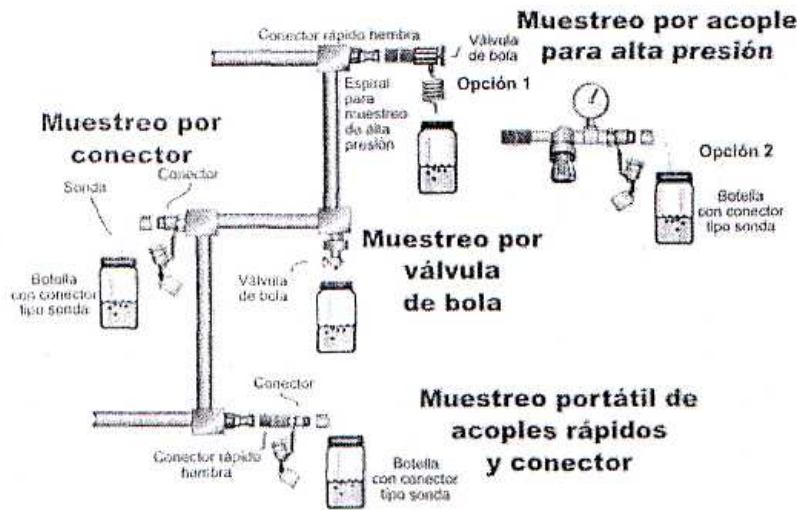


Fig. 8-9: configuraciones diferentes de muestreo.

La Fig. 8-10 muestra una válvula tipo conector minimess, instalada en maquinaria hidráulica. Esta válvula está equipada adecuadamente con una cubierta contra suciedad que protege las partes internas del puerto de muestreo contra partículas. Cuando la tapa cuenta con empaquetadura (O-ring), también sirve como un sello secundario en el improbable caso de que la válvula conector pudiera fallar.

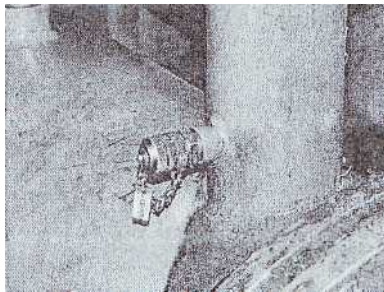


Fig. 8-10: Muestreo por conector.

### 8.5.3 Muestreo de líneas circulantes de baja presión

Ocasionalmente, una línea de drenado, alimentación o retorno, no está suficientemente presurizada para tornar una muestra. En esos casos se requiere de la ayuda de una bomba de vacío equipada con un adaptador especial que permita conectarla momentáneamente a una válvula, como una de tipo conector minimess, usada comúnmente para el muestreo. Una válvula tipo conector cuenta con un dispositivo de apertura mecánico que es abierto mediante una sonda. Con el adaptador enroscado al conector, el fluido puede pasar a la botella a través de la bomba de vacío (Fig. 8-11).



Fig. 8-11: Muestreo en depósito Inundado.

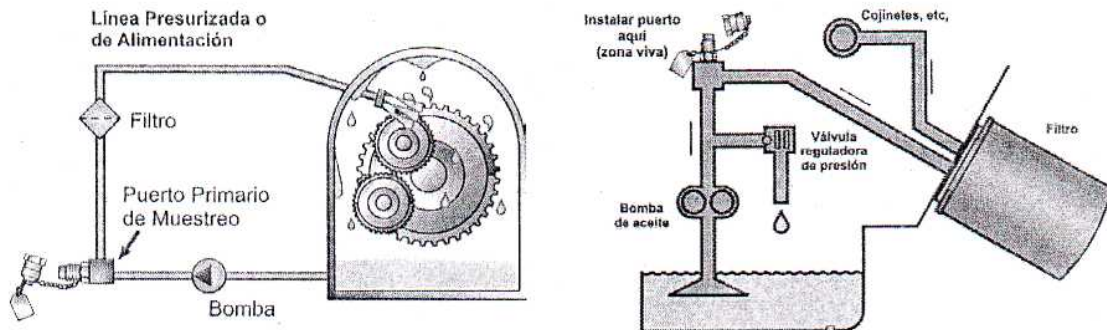
Frecuentemente, hay aplicaciones en donde no se tiene acceso a líneas de retorno o de drenado, o no existen tales líneas esto sucede generalmente en depósitos inundados, en

donde el depósito dentro de su cubierta funciona como reservorio. Algunos ejemplos de depósitos inundados incluyen:

- ☞ Motores a diesel
- ☞ Cajas de engranes circulatorios
- ☞ Compresores circulatorios

En esas aplicaciones, debido a que no hay línea de retorno, el fluido debe ser muestreado desde la línea presurizada de suministro de aceite a los engranes y rodamientos (Fig. 8-12). La muestra debe ser tomada antes del filtro, si lo hay.

El mejor lugar para muestrear aceite de un motor de combustión interna, es justo antes del filtro. Instale la válvula de muestreo entre la bomba y el filtro. Esta ubicación de muestreo es la preferida, en vez del uso de muestreo por puerto de drenado o usando una bomba de vacío y una manguera a través del tubo de la varilla de nivel de aceite.



**Fig. 8-12: El fluido debe ser muestreado desde la línea presurizada de suministro de aceite.**

La Fig. 8-13 muestra otro ejemplo de un depósito inundado con circulación que tiene un sistema externo de filtración, conocido con frecuencia como “filtro riñón”. Este sistema circulante fuera de línea, proporciona una ubicación ideal para instalar una válvula de muestreo entre la bomba y el filtro.



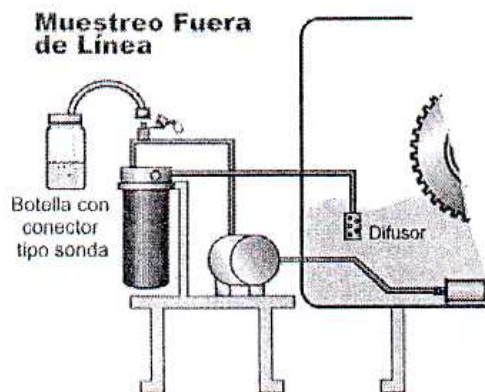


Fig. 8-13: Sistema externo de filtración, conocido con frecuencia como "filtro riñón".

Se puede utilizar una válvula de bola o tipo conector para que el fluido a presión fluya fácilmente hacia la botella de muestra sin afectar el sistema en operación o el sistema de filtración.

#### **8.5.4 Muestreo en sistemas no circulantes**

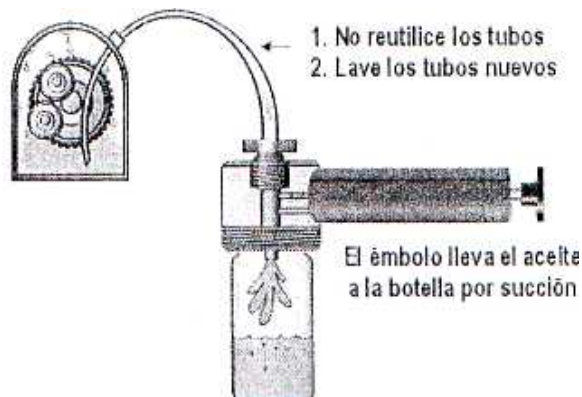
Hay numerosos ejemplos donde no se cuenta con circulación forzada y la muestra debe tomarse del depósito del sistema o de su contenedor. Con frecuencia, esto debe ser efectuado con el equipo "en operación". Algunos ejemplos de estos sistemas son los rodamientos lubricados por baño, por arillo o collarín y cajas de engranes lubricadas por salpique. Todas estas situaciones incrementan el reto en la obtención de una muestra representativa.

El método básico para el muestreo de tales depósitos es removiendo el tapón de drenado del fondo del depósito y dejar que una cantidad de fluido entre en la botella de muestra. Por muchas razones, este método y ubicación de muestreo no son lo ideal. Pero lo más importante, es que los sedimentos, partículas de desgaste y otras partículas (incluyendo agua) que se encuentran en el fondo entran en la botella en concentraciones que no son representativas de lo que está pasando cerca o alrededor de las zonas donde el aceite lubrica la máquina. El método de muestreo por el tapón de drenado debe evitarse siempre que sea posible.

El método de muestreo por el tapón de drenado puede ser mejorado sustancialmente si se instala un pequeño tubo, hacia adentro y hacia arriba, en la zona de movimiento del fluido del depósito del carro de filtración. Una vez que se ha mezclado lo suficiente, se puede tomar la muestra por la válvula de muestreo (instalada entre la bomba y el filtro). Ya que se ha tomado la muestra se puede conectar el filtro para limpiar el aceite.

### **8.5.5 Muestreo por succión por manguera plástica**

Uno de los métodos más comunes de muestreo de un contenedor inundado, lubricado por baño o por salpique, es mediante el uso de una bomba de vacío y manguera. Se introduce un tubo o manguera a través del puerto de llenado o de la varilla de medición de nivel de aceite - usualmente a la mitad del nivel de aceite (Fig. 8-14).



**Fig. 8-14: Muestreo por manguera y bomba de vacío.**

Este método de muestreo tiene muchas desventajas y debe evitarse si se puede utilizar alguno de los métodos previamente descritos. A continuación tenemos un resumen de los riesgos y problemas asociados con el uso de bomba de vacío y manguera plástica:

- ☞ **Ubicación de la manguera.** Una manguera que se introduce directamente dentro del puerto de llenado o de indicador de nivel, es muy difícil de controlar. La posición final de la manguera es difícil de predecir, dando como resultado que las muestras sean tomadas de diferentes lugares cada vez. Siempre existe el riesgo de que la manguera vaya hasta el fondo del tanque o depósito, en donde están concentradas las partículas y los sedimentos.

- ☞ ***Contaminación de la manguera.*** Existe la posibilidad de que la manguera recoja partículas de los lados del contenedor mientras está siendo introducida. Igualmente, la manguera misma puede estar contaminada, debido a mala limpieza cuando fue producida o mientras estaba en almacenamiento.
  
- ☞ ***Gran volumen de purga.*** Este método incrementa sustancialmente el volumen de fluido que debe ser purgado para que la muestra sea representativa. En algunos sistemas de depósitos pequeños, esto prácticamente representa cambiar el aceite. Así mismo, si el volumen de fluido no es reemplazado, la máquina podría ser operada con un volumen de lubricante inadecuado.
  
- ☞ ***Precipitación de partículas.*** En la mayoría de los sistemas, se debe parar la operación mientras se efectúa el método de toma de muestra por manguera y succión. Esto significa que la producción se verá afectada en beneficio del muestreo de aceite o la frecuencia de muestreo debe alterarse debido a las prioridades de producción. Ninguna de estas situaciones es ideal. Así mismo, las partículas comienzan a asentarse y estratificarse en función de sus dimensiones inmediatamente después de apagar el equipo y comprometen la calidad del análisis de aceite.
  
- ☞ ***Intrusión a la máquina.*** En este método de inmersión la manguera es introducida. La máquina debe abrirse para la toma de la muestra, esta introducción induce al riesgo de contaminación y siempre existe la preocupación de que la máquina pudiera no lograr ser restablecida a sus condiciones de operación antes de arrancarla nuevamente. Utilizar el método de manguera plástica y bomba de vacío, deberá considerarse como la última opción. Sin embargo, existen situaciones en donde no hay disponible otro método de muestreo que pueda ser aplicado prácticamente. En caso de que el muestreo por manguera y bomba de vacío deba utilizarse en sistemas circulantes, la mejor ubicación para obtener la muestra es entre la línea de retorno y la línea de succión (Fig. 8-15).

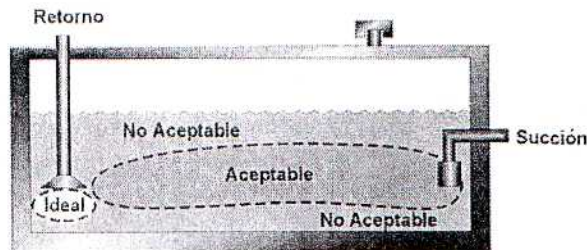


Fig. 8-15: Ubicación para obtener una buena muestra de fluido en un sistema circundante.

Esto se conoce como el “circuito corto”. Aún en los casos en que existan deflectores en el tanque, la muestra debe tomarse de la zona de flujo más directa entre sus líneas de succión y retorno. Idealmente esto será tan cerca como sea posible del tubo de retorno. Si existen deflectores en esa zona, la muestra debe tomarse en el lado de retorno del deflector.

Para asegurar que la manguera de plástico sea siempre introducida a la misma profundidad, se puede fijar un peso al extremo de la manguera, introduciendo siempre una longitud de manguera igual en el tanque. Una forma más fácil es fijar la manguera a una varilla de plástico o metal utilizando alambre o amarres (Fig. 8-16). Luego, mida una distancia fija del extremo de la manguera al extremo inferior de la varilla para que la varilla baje, y toque el fondo del tanque, mientras el extremo de la manguera conserva una distancia fija por arriba del fondo. Esta “separación fija” debe ser usada de manera consistente cada vez que se tome una muestra.



Fig. 8-16: Otra manera de obtener una muestra de fluido en un sistema circundante.

### **8.5.6 Botellas y dispositivos de muestra**

Un factor importante en la obtención de una muestra representativa, es asegurarse de que el dispositivo de muestreo se ha limpiado por completo antes de obtener la muestra. Esto generalmente se logra utilizando una botella de repuesto para contener el fluido purgado. Es importante purgar de 5 a 10 veces el volumen contenido en el espacio muerto (fluido sin movimiento) antes de obtener la muestra. Todos los dispositivos que tienen contacto con el aceite se consideran espacio muerto y deben ser limpiados, incluyendo:

- ☞ Tuberías del sistema sin movimiento
- ☞ Puertos de muestreo, válvulas y adaptadores
- ☞ Sondas y dispositivos de muestreo
- ☞ Adaptadores para el uso de bombas de vacío para la extracción de las muestras
- ☞ Mangueras plásticas usadas en bombas de vacío (estas mangueras no deben ser reutilizadas para evitar contaminación cruzada entre aceites).

Hay una gran variedad de botellas de muestreo que pueden ser utilizadas en el análisis de aceite. Se necesita seleccionar una botella adecuada para la aplicación y las pruebas

planeadas. Considere las siguientes características al momento de seleccionar botellas de muestra:

☞ **Tamaño.** Hay disponibles varias medidas diferentes de botellas de muestra. Varían desde 50 ml a las botellas más comunes de 100 a 120 ml. Las botellas grandes son preferidas cuando se requiere realizar pruebas de conteo de partículas y análisis de viscosidad. Cuando se requieran varias pruebas será necesario utilizar una botella de 200 ml (o dos de 100 ml). Coordínese con el laboratorio para seleccionar el tamaño de botella que proporcione suficiente volumen de muestra para realizar todas las pruebas requeridas y dejar un poco extra almacenado, en caso que se requiera hacer alguna excepción. Otro factor para la selección del tamaño de la botella, es que la botella no debería llenarse hasta el tope con fluido durante el proceso de muestreo. Solo debe llenarse una parte de la botella, ya que el espacio superior es necesario para permitir una adecuada agitación del fluido en el laboratorio, para restablecer la distribución uniforme de las partículas suspendidas y agua en la muestra. A continuación se detalla una guía general para el llenado de las botellas de muestra:

- **Viscosidad baja (ISO VG 32 o menos) es llenado hasta 3/4 el volumen total.**
- **Viscosidad media (ISO VG 32 a ISO VG 100) es llenado hasta 2/3 del volumen total.**
- **Viscosidad alta (arriba de ISO VG 100) es llenado hasta la mitad del volumen total.**

☞ **Material.** Las botellas de muestra están disponibles en diferentes materiales.

☞ **Nivel de limpieza de la botella de muestra.** Una de las consideraciones más importantes en la selección de una botella de muestra es asegurarse de que está lo suficientemente limpia. El nivel de limpieza requerido debe ser determinado por anticipado. El proveedor de las botellas debe proporcionar, con cada pedido de botellas (o por requerimiento), un certificado del grado de limpieza basado en la prueba aleatoria de las botellas por ISO 3722. El reporte debe identificar la media y

desviación estándar para el lote del cual se tomaron las botellas enviadas. Las botellas pueden clasificarse de acuerdo con su contribución en el conteo de partículas dentro de las siguientes categorías de limpieza:

- ***Limpias.*** Menos de 100 partículas mayores a 10 micrones por ml de fluido.
- ***Súper limpias.*** Menos de 10 partículas mayores a 10 micrones por ml de fluido.
- ***Ultra limpia.*** Menos de 1 partícula mayor a 10 micrones por ml de fluido.

### **8.5.7 Consejos importantes para un muestreo de aceite efectivo**

Para conseguir información certera de análisis de aceite, donde el muestreo y el análisis de aceite producen la información más representativa y fácil de convertir en tendencia, se debe seguir estas tácticas básicas de muestreo:

1. Las máquinas deben estar operando en su aplicación durante el muestreo. Esto significa que se debe realizar el muestreo cuando las máquinas están a temperatura, cargas, presión y velocidad de operación normales, en un día típico. Si eso se logra, la información también será típica, lo cual es precisamente lo que se desea.
2. Tomar siempre la muestra antes de los filtros y después de componentes de la máquina, tales como rodamientos, engranes, pistones, levas, etc. Esto asegurará que los resultados sean ricos en información. También asegura que no haya datos (como partículas) que hayan sido removidos por filtros o separadores.
3. Desarrollar procedimientos escritos específicos para cada sistema muestreado. Esto asegura que cada muestra sea extraída de una manera consistente. Los procedimientos escritos también ayudan a los nuevos miembros del equipo a aprender rápidamente el programa.
4. Asegurar que las válvulas y dispositivos de muestreo hayan sido completamente limpiados antes de tomar la muestra. Las bombas de vacío y sondas para muestra también deben limpiarse, y si hubiera alguna duda acerca del grado de limpieza de botella, esta también deberá ser limpiada.

5. Asegurar que las muestras se tomen con la frecuencia adecuada y que ésta es suficiente para identificar los problemas comunes e importantes (más de este tema será tratado más adelante). Siempre que sea posible, especialmente en muestras de motores y trenes de mando, registre las horas en el aceite, listo puede ser una lectura del odómetro o algún otro registro que identifique la cantidad de tiempo que el aceite ha permanecido en la máquina. Si se ha rellenado el fluido o se ha efectuado cualquier cambio en la condición del aceite, como la adición de aditivos, drenado parcial, o cualquier otro caso similar, comuníquese esta información al laboratorio.
6. Enviar las muestras al laboratorio de análisis de aceite inmediatamente después de haberlas tomado. Las propiedades del aceite en la botella y del aceite en la máquina empiezan a moverse en direcciones diferentes a partir del momento en que se extrae la muestra. Analizar rápidamente la muestra asegura la más alta calidad y decisiones oportunas.

#### **Fuentes de Información incorrecta**

- Los sistemas son muestreados con el equipo frío (no trabajando como es normal).
- Muestreo en puertos de drenado o muestreo por succión y con manguera plástica.
- Métodos y ubicaciones de muestreo variables.
- Equipo de muestreo contaminado.
- Purga insuficiente de espacio muerto.
- Muestreo justo después de un cambio de aceite.
- Contaminación cruzada de fluidos entre dos muestras.
- Enviar la muestra al laboratorio mucho tiempo después de haber sido tomada.

#### **8.5.8 Frecuencia de muestreo de aceite**

El objetivo del análisis de aceite, como el del monitoreo de condición en general, es encontrar las malas noticias. El objetivo del mantenimiento proactivo es administrar esas malas noticias para eliminarlas. La máquina y el aceite por lo general emiten alarmas silenciosas cuando los problemas inician. Con el tiempo, conforme incrementa la severidad,



esas alarmas dejan de ser silenciosas y aún los métodos de monitoreo de condición más rudimentarios pueden revelar el problema. Por supuesto, en este punto, probablemente el daño ocurrido es bastante grande y probablemente, sea muy tarde para corregir el problema con el equipo trabajando; puede que la máquina tenga que desarmarse y ser reparada.

Uno de los beneficios extraordinarios del análisis de aceite es su increíble sensibilidad a esas alarmas silenciosas y la detección de fallas y averías incipientes. Los métodos para lograr esto satisfactoriamente, serán discutidos en capítulos posteriores. Sin embargo, el principio básico consiste en que no se puede escuchar una alarma a menos que esté tratando de escucharla. Dicho de otra manera, no se puede atrapar un pez a menos que se tenga anzuelo en el agua. A diferencia de otras técnicas de monitoreo de condición de la maquinaria que emplean pruebas mensuales, muchos programas de análisis de aceite están basados en muestreo anual o semi-anual. Esta falta de frecuencia de muestreo, pone en peligro las poderosas capacidades proactivas y predictivas del análisis de aceite.

La programación de los intervalos de muestreo es común en el análisis de aceite. La frecuencia debe estar acorde con los intervalos de drenado u horas de operación. La tabla 8-4, proporciona los intervalos recomendados usualmente por horas de operación para diferentes clases de máquinas. La frecuencia de muestreo debe ser ajustada correctamente, considerando los siguientes criterios específicos de máquina y aplicación:

Motores Diesel fuera de carretera	<b>150</b>
Transmisión, diferenciales, mandos finales	<b>300</b>
Hidráulicos equipo móvil	<b>200</b>
Turbina de gas industrial	<b>500</b>
Turbina de vapor	<b>500</b>
Compresor aire/gas	<b>500</b>
Enfriadores	<b>500</b>

Caja de engrane alta velocidad/carga	<b>300</b>
Caja de engrane baja velocidad/carga	<b>1000</b>
Cojinetes planos y rodamientos	<b>500</b>
Motores reciprocantes de aviación	<b>25-50</b>
Turbinas de gas aviación	<b>100</b>
Cajas de engranes de aviación	<b>100-200</b>
Hidráulicos de aviación	<b>100-200</b>

Tabla 8-4: intervalos recomendados usualmente por horas de operación para diferentes clases de máquinas.

- ☞ **Penalización por la falla.** Deben considerarse aspectos como seguridad, costos por paro forzado, por reparación y costos generales por la interrupción general del negocio por la falla del equipo que se está muestreando.
- ☞ **Severidad del entorno de trabajo del fluido.** Las condiciones de operación y el medio ambiente del fluido influyen en la frecuencia y el avance de la tasa de de falla. Esto incluye presión, carga, temperatura, velocidad, tasa de ingreso de contaminantes y severidad de ciclo del sistema.
- ☞ **Edad de la máquina.** Para la mayoría de las máquinas las posibilidades de falla son mayores en el arranque y después de reparaciones mayores y revisiones. Igualmente, el riesgo incrementa según la máquina se acerca al fin de su vida esperada. Incremente la frecuencia de muestreo durante esos períodos.
- ☞ **Edad del aceite.** Los aceites recién cambiados y aquellos que tienen mucho tiempo trabajando en la maquinaria tienen el mayor riesgo. Los aceites nuevos son aquellos que apenas han sido cambiados y están debajo del 10 % de su vida esperada. Ocasionalmente, se pone el aceite incorrecto en la máquina durante el cambio, o las condiciones del aceite nuevo no son satisfactorias para el servicio. Un aceite viejo puede mostrar tendencias que sugieren agotamiento de aditivos, el inicio de la

oxidación o altos niveles de contaminación. Se debe ajustar la frecuencia de muestreo de acuerdo a esto.

### **8.5.9 Registro del equipo para análisis de aceite**

Las muestras que se envían a laboratorios de análisis de aceite externos, requieren que se llene y envíe toda la información necesaria del registro de la maquinaria. El registro debe incluir descripción de la máquina, historia de la máquina, información acerca del medio ambiente y la aplicación, además de la descripción y especificaciones del lubricante. A continuación se presenta una lista y se discute la información a incluir en el registro:

- ☞ **Nombre o número de identificación de la máquina.** Puede ser un número económico, número de serie o un nombre. Si el componente a muestrear tiene más de un punto de muestreo, debe usarse un identificador adicional para distinguir a este de otra ubicación de muestreo.
  
- ☞ **Tipo de unidad.** Esto identifica el componente que está siendo muestreado. El tipo de unidad es la parte menos identificada en la mayoría de las listas de equipo, y es el punto de información más crítico desde el punto de vista de la interpretación. Mientras mayor información se proporcione, más específico puede ser el analista en la interpretación. Por ejemplo, “compresor” no es un tipo de unidad válido, lo correcto es: aceite de rodamiento interior de compresor, (asumiendo que existe más de un sistema de aceite o punto de muestreo). Freno de prensa hidráulica no es un tipo de unidad válido; bomba hidráulica de paletas de alta presión, sí lo es. Muchos laboratorios tienen viñetas de estándares basados en tipos de unidades específicos detallados. Si la información no es lo bastante específica, puede provocar que la muestra pase a través de una tabla “genérica” de estándares. Por lo tanto, vale la pena el esfuerzo de intentar obtener información específica de la unidad que está siendo muestreada.
  
- ☞ **Fabricante y modelo de la máquina o componente.** Si el componente es por ejemplo una bomba centrífuga, se requiere informar de la marca y modelo de la bomba. Si es un sistema hidráulico, se necesita la marca y modelo de la bomba

hidráulica. Esta información es muy útil en la identificación de la metalurgia, y los rangos de metales de desgaste que se pueden esperar bajo condiciones normales.

☞ ***Fabricante del fluido, tipo de fluido (nombre) y grado (ISO o SAE por ejemplo).***

La identificación completa del fluido es casi tan importante como la identificación del componente. Muchos laboratorios usan tablas de estándares contra las que comparan las propiedades físicas y químicas del aceite en uso. Si un tipo de aceite no es identificado apropiadamente, será comparado un estándar erróneo, conduciendo a conclusiones equivocadas.

☞ ***Condiciones ambientales y de operación.*** Cualquier información colateral acerca de la aplicación y el medio ambiente en el cual debe operar la máquina es benéfico para el analista durante la evaluación de la información del análisis de aceite.

### **8.5.10 Etiquetas e identificación de botellas de muestra**

El uso de etiquetas en botellas de muestra es más que un simple sistema de identificación. La etiqueta y/o documentación acompañante, identifica información clave acerca de la muestra, la máquina, y las pruebas requeridas incluyendo cualquier instrucción especial. Mientras que durante el registro de la máquina e historia del componente se proporciona una gran cantidad de información, ocurren cambios todo el tiempo, muchos de los cuales afectan los resultados del análisis de aceite. A continuación tenemos una lista de la información más común que debe proporcionarse con la muestra de aceite:

- ☞ Identificación de la máquina.
- ☞ Punto de muestreo.
- ☞ Fecha de toma de muestra.
- ☞ Condiciones de operación frías o calientes.
- ☞ Horómetro (o nivel de uso aproximado de la máquina desde que se tomó la última muestra).
- ☞ Último cambio de fluido.

- ☞ Última adición o relleno de fluido y cantidad.
- ☞ Último servicio mayor o reparación.
- ☞ Último cambio de filtro.
- ☞ Anormalidades de la máquina/fluido reportadas por el operador o técnico.
- ☞ Conjunto de pruebas requeridas incluyendo cualquier prueba especial o de excepción.

## **8.6 Análisis y pruebas del aceite**

El análisis de aceite es un extenso campo que comprende cientos de pruebas individuales, que proporcionan beneficios significativos mediante la valoración de una o más de las propiedades de un lubricante o máquina. Muchas de las pruebas proporcionan información sobre los aceites nuevos, en las que se evalúan las propiedades físicas, químicas o de lubricación, para el control de calidad, desarrollo de productos y clasificación de desempeño de productos.

El análisis de aceite en uso, difiere substancialmente del análisis de aceite nuevo. El objetivo del análisis de aceite en uso, es evaluar la condición de los aceites que están en servicio y evaluar la condición de las máquinas que son lubricadas. En aplicaciones de monitoreo de condición de maquinaria, el lubricante sirve simplemente como el vehículo de la información que es generada en la máquina en la forma de contaminación o partículas de desgaste.

En el análisis de aceite en uso, se realizan regularmente un pequeño número de pruebas para soportar decisiones importantes acerca de la máquina y del lubricante.

### **8.6.1 Razones para realizar análisis de aceite**

Esencialmente, el análisis de aceite se efectúa para mejorar la calidad en las decisiones de mantenimiento de la máquina y lubricación. Hay tres categorías importantes del análisis de aceite:

- ☞ **Análisis de las propiedades de los fluidos (1.a salud del lubricante).** Esta categoría del análisis de aceite trata de la evaluación de las propiedades físicas, químicas y de los aditivos del aceite.
- ☞ **Análisis de contaminación (la contaminación del lubricante).** Los contaminantes son materia externa que se introduce al sistema desde el medio ambiente o es generada internamente. La contaminación compromete la confiabilidad de la máquina y promueve la falla del lubricante. El análisis de aceite asegura que las acciones encaminadas al cumplimiento de la meta de control de contaminación se mantengan.
- ☞ **Análisis de partículas de desgaste (el desgaste de la maquinaria).** Cuando los componentes se desgastan, generan partículas. El monitoreo y análisis de las partículas generadas permite a los técnicos detectar y evaluar condiciones anormales para que se puedan hacer e implementar decisiones de mantenimiento efectivas para controlar el desgaste.

En la tabla 8-5 están tabuladas las pruebas de análisis de aceite más comunes y los beneficios relacionados con sus tres categorías.

Lo que se analiza	1 Propiedades del fluido. Propiedades físicas y químicas del aceite usado (proceso de envejecimiento).	2 Contaminación. Contaminantes destructivos de la máquina y el lubricante.	3 Partículas de desgaste. Presencia e identificación de partículas.
<b>Pruebas posibles</b>	• Máximo Beneficio	➤ Mínimo beneficio	○ No hay beneficio
Conteo de partículas	○	•	➤
Análisis de Humedad	○	•	○
Análisis de viscosidad	•	➤	○

Densidad ferrosa	○	○	●
Ferro grafía analítica	○	➤	●
AN/BN (neutralización)	●	➤	➤
Infrarrojo (FTIR)	●	➤	○
Pruebas de membrana	○	●	➤
Punto de inflamación	➤	●	○
Análisis de elementos	●	➤	●
	<b>Proactivo</b>	<b>Proactivo</b>	<b>Predictivo</b>

Tabla 8-5: pruebas de análisis de aceite más comunes.

## 8.6.2 Revisión de las pruebas de análisis de aceite más comunes

### 8.6.2.1 Conteo de partículas

El método de conteo de partículas proporciona la cantidad de partículas que hay en el aceite en un rango específico de tamaños por volumen de fluido (usualmente por ml o 100 ml). La concentración de partículas y sus datos de distribución deben expresarse en términos de Códigos de niveles de contaminación sólida ISO 4406 (tabla 8-6) y por otros sistemas de codificación usados menos frecuentemente como NAS 1638 y SAE 749 (descontinuado). Las partículas pueden ser contadas manualmente con técnicas de microscopio óptico, o automáticamente usando contadores de partículas ópticos o de bloqueo de poro.

ISO 4406:99		
Número de partículas por ml		Número de Rango (R)
Mayores que	Hasta e inclusive	
80000	160000	24
40000	80000	23

20000	40000	22
10000	20000	21
5000	10000	20
2500	5000	19
1300	2500	18
640	1300	17
320	640	16
160	320	15
80	160	14
40	80	13
20	40	12
10	20	11
5	10	10
2.5	5	9
1.3	2.5	8
0.64	1.3	7
0.32	0.64	6
0.16	0.32	5
0.08	0.16	4
0.04	0.08	3
0.02	0.04	2
0.01	0.02	1

**Tabla 8-6: Código de contaminación sólida.**

Sin importar el método seleccionado, se recomienda que se utilice el mismo método consistentemente para asegurar que los resultados sean comparables. En seguida se tiene una lista de las posibles causas de inconformidad en lecturas de conteo de partículas:

- ☞ **Error en el muestreo.** Pobre control sobre los procedimientos de muestreo dará como resultado falsos positivos o falsos negativos en las lecturas de conteo de partículas dependiendo de la naturaleza de la falla en el proceso de muestreo. Se aconseja repetir el muestreo y repetir la prueba cuando se observen altos o bajos cónicos de partículas para eliminar error en el muestreo de la lista de causas posibles.



- ☞ ***Error de instrumento.*** Un contador de partículas está sujeto a errores relacionados con calibración al igual que cualquier instrumento. La calibración del instrumento debe verificarse regularmente.
- ☞ ***Error en los procedimientos de prueba.*** Las muestras deben ser agitadas agresivamente con un agitador de los utilizados comercialmente para agitar pintura antes de comenzar las pruebas para distribuir regularmente las partículas en el aceite. La agitación manual no garantiza la resuspensión de las partículas, igualmente, cuando se use un contador óptico de partículas, el aire atrapado y el agua suspendida deben ser removidos completamente previo a la prueba.
- ☞ ***Ingestión de tierra.*** La entrada de tierra al sistema a través de los filtros, respiradores y el aceite nuevo conducen a un aumento en el conteo de partículas. Se debe diagnosticar de acuerdo al diagrama de flujo en la Fig. 8-17.
- ☞ ***Falla del filtro.*** Cuando un filtro está lleno y la válvula de alivio está en derivación, o falla de alguna manera, el conteo de partículas incrementa. Se debe diagnosticar de acuerdo con el diagrama de flujo en la Fig. 8-17.
- ☞ ***Generación de desgaste.*** Cuando los componentes de la máquina están dañados o fatigados, se liberan partículas de desgaste al aceite, ocasionando un aumento en el conteo de partículas. Diagnosticar de acuerdo al diagrama de flujo en la Fig. 8-17

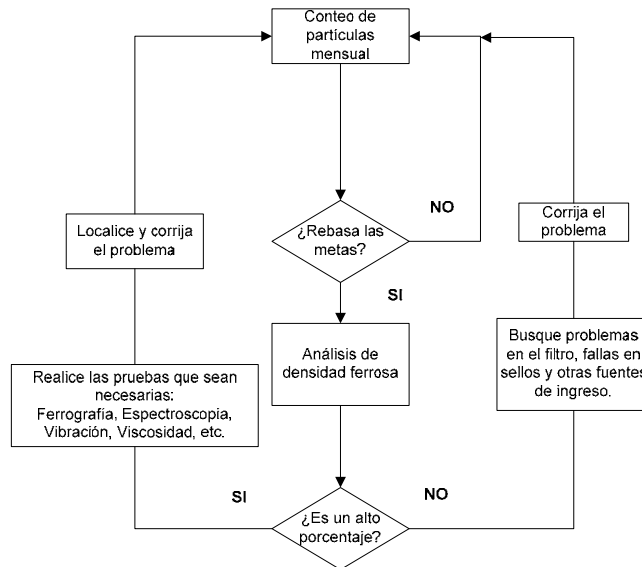


Fig. 8-17: Secuencia de diagnóstico para detectar fallas por ingestión de tierra, falla de filtro y generación de desgaste.

### 8.6.2.2 Viscosidad

La viscosidad cinemática es la medida de la resistencia de un fluido a fluir bajo fuerzas gravitacionales. Se determina midiendo el tiempo en segundos, que requiere un nivel determinado de fluido para fluir una distancia conocida, bajo gravedad a través de un capilar de un viscosímetro calibrado, bajo una presión y temperatura controlada estrechamente (Fig. 8-18). Este valor puede convertirse a las unidades de centistokes (cSt) o Segundos Saybolt Universales (SUS o SSU) como se muestra en la tabla 8-7

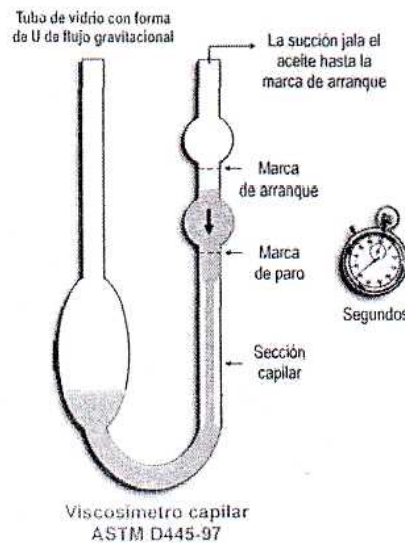


Fig. 8-18: Instrumentos para determinar la viscosidad cinemática.

<b>ISO VG* (cSt)</b>	<b>SAE motor</b>	<b>SAE Engranés</b>	<b>SUS 210<sup>0</sup>F</b>	<b>SUS 100<sup>0</sup>F</b>
<b>150</b>	<b>40</b>	<b>90</b>	<b>75</b>	<b>700</b>
<b>100</b>	<b>30</b>	<b>85</b>	<b>60</b>	<b>500</b>
<b>68</b>	<b>20</b>	<b>80</b>	<b>55</b>	<b>350</b>
<b>46</b>	<b>20</b>	<b>75</b>	<b>45</b>	<b>250</b>
<b>32</b>	<b>10</b>	<b>-</b>	<b>43</b>	<b>150</b>
<b>22</b>	<b>5</b>	<b>-</b>	<b>40</b>	<b>100</b>
<b>15</b>	<b>-</b>	<b>-</b>	<b>-</b>	<b>80</b>
<b>10</b>	<b>-</b>	<b>-</b>	<b>-</b>	<b>60</b>

SUS=SSU

**Para convertir cSt a SUS multiplique cSt por 4.632 @ 100<sup>0</sup>F o 4.664 @ 210<sup>0</sup>F  
Basado en aceites con índice de viscosidad 95**

**Tabla 8-7: Conversiones de unidades de centistokes (cSt) o Segundos Saybolt Universales (SUS o SSU) para valores de viscosidad cinemática.**

El reporte de viscosidad sólo es válido cuando se reporta la temperatura a la que la prueba se efectuó, por Ej., 32 cSt a 40°C.

La viscosidad afecta la operación del equipo, pérdidas por fricción y el espesor de la película de aceite en los cojinetes. Su medición y tendencia son, por lo tanto, críticas para usarse en el análisis de aceite. Aún los cambios más modestos en la viscosidad pueden afectar adversamente el desempeño y estabilidad del lubricante causando posiblemente contacto metal-metal y desgaste. El cambio en la viscosidad del lubricante es un síntoma común de la presencia de otros problemas.

La tasa de cambio de viscosidad por la degradación del aceite depende de la presencia de agentes estresantes térmicos y oxidantes en el sistema. Un cambio de viscosidad también puede ser resultado de lo siguiente:

- ☞ Cantidades excesivas de contaminación como agua, glicol, combustible, solventes y/o partículas muy pequeñas.
- ☞ Degradación química severa, comúnmente debida a la oxidación.
- ☞ Volatilización de los extremos ligeros del aceite básico
- ☞ Relleno con grado de viscosidad incorrecto
- ☞ Corte mecánico severo en el aceite

### **8.6.2.3 Número ácido (AN)**

Aplicado a aceites industriales (no de motor), el número ácido (AN) es la medida de la concentración de ácidos del aceite. El resultado de la prueba de AN se expresa como el volumen (miligramos) de hidróxido de potasio (KOH) requerido para neutralizar todos los componentes ácidos en un gramo de muestra de aceite. La unidad reportada es mg. KOH/gr de aceite, El AN puede ser cuantificado por cualquiera de los dos métodos, colorimétrico o titulación potencio métrica, sin embargo, para aceites color oscuro se debe utilizar el último método.

Algunos de los aditivos de los lubricantes, esto es, los aditivos anti-herrumbre y anti-desgaste pueden provocar un valor inicial alto de AN. Con el tiempo, este valor puede disminuir ligeramente según se agoten los aditivos. Según se oxida y envejece el aceite, se forman pequeñas cantidades de sub-productos ácidos en el aceite, provocando un incremento en el AN. El grado en que aumenta el AN por encima o por debajo de la línea de base del aceite nuevo es indicativo de hasta qué punto se ha degradado el aceite. Un AN alto comúnmente indica que la vida útil del aceite se ha agotado y la necesidad de cambiarlo, El AN por encima de 4.0 es considerado altamente corrosivo, atacando materiales de los cojinetes y otras superficies metálicas. Este riesgo aumenta en presencia de contaminación por agua reforzando el potencial corrosivo de los ácidos.

Un incremento lento del AN después de un período largo de uso se considera normal. El cambio rápido en el AN puede ser ocasionado por uno o más de los siguientes factores:

- ☞ Oxidación severa del aceite.
- ☞ Agotamiento de algunos aditivos (anti-desgaste, EP y prevención de herrumbre).

- ☞ Rellenos prolongados con aceite incorrecto como un aceite hidráulico anti-desgaste o aceite de engranes que tienen valores altos en la línea de base de AN.

#### **8.6.2.4 Número básico (BN)**

Aplicado principalmente a aceites de motor, el BN mide la reserva alcalina de un aceite. Los aceites de motor están equipados con aditivos que proporcionan reserva alcalina para neutralizar los ácidos generados durante la combustión. Una vez que esta reserva se agota, el aceite se puede tornar altamente corrosivo. Como en la prueba de AN, la prueba de BN se realiza por titulación colorimétrica o potenciométrica (comúnmente se usa la potenciométrica debido a lo oscuro del aceite de motor).

Pero en el caso de BN el aceite alcalino se neutraliza con ácido clorhídrico (preferido para análisis de aceite en uso) o ácido perclórico. Los resultados se reportan en mg KOH/gr. de aceite, igual que en la prueba de AN, lo cual puede causar confusión. El resultado es en realidad un valor derivado que representa el volumen de KOH requerido para neutralizar el volumen de reactivo ácido necesario para neutralizar la muestra alcalina de la cual se desea conocer el valor del BN. De esta manera, las unidades están sincronizadas, esto es, una unidad de BN neutraliza una unidad de AN.

La tendencia de los números BN constantemente desciende según se agota la reserva alcalina del aceite por la combustión y reacción con productos ácidos de oxidación. Un cambio rápido en el BN puede ser causado por uno o más de los siguientes factores:

- ☞ Quemar combustible con alto contenido de azufre.
- ☞ Dilución anormal de combustible.
- ☞ Mala combustión.
- ☞ Exceso de fuga de gases de combustión.
- ☞ Contaminación por hollín.
- ☞ Oxidación severa.
- ☞ Intervalos de drenado muy extendidos.
- ☞ Relleno con aceite incorrecto.
- ☞ Dilución por glicol.

Interprete la tendencia del número BN de acuerdo al diagrama de flujo de la Fig.8-19 Si el BN cambia rápidamente, determine la causa raíz y ponga en práctica acciones correctivas.

Estándares aplicables: ASTM D974, ASTM D2896, ASTM D4739

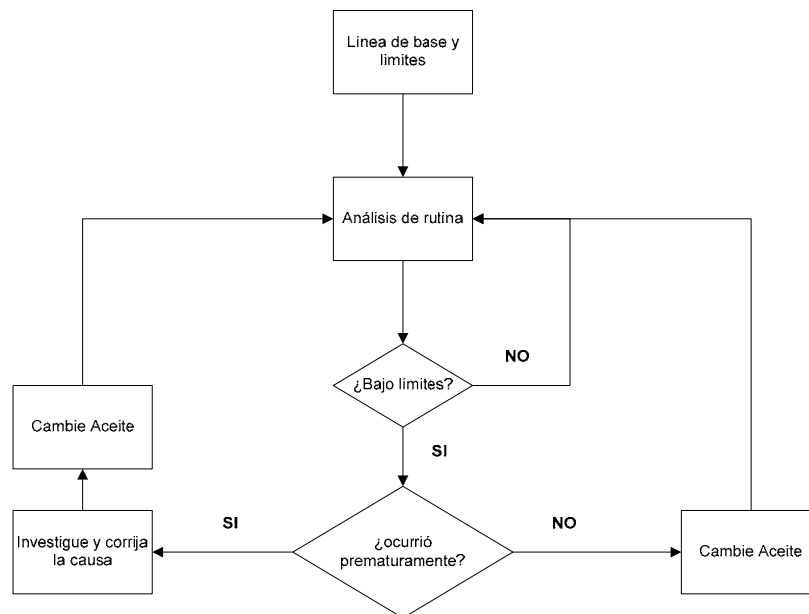


Fig. 8-19: Diagrama para Interpretar la tendencia del número BN.

### 8.6.2.5 Espectroscopia infrarroja por transformadas de Fourier (FTIR)

FTIR es un método que proporciona un medio rápido para monitorear múltiples parámetros del aceite simultáneamente. Para realizar esta prueba, se hace pasar una cantidad de espesor fijo de aceite al instrumento FTIR y se transmite energía infrarroja a través de la muestra de aceite. La energía infrarroja es absorbida en diferentes frecuencias por diferentes propiedades del aceite, sus aditivos y contaminantes. Se aplica una Transformada Rápida de Fourier (TRF) para crear un espectro de frecuencia de energía infrarroja atenuada, o energía infrarroja transmitida (método preferido). El espectro del aceite en uso se compara con la línea de base de un aceite nuevo idéntico para analizar los contaminantes como hollín, agua, glicol, combustible, solventes químicos, aditivos inhibidores de oxidación y anti desgaste, y degradación causada por nitración, oxidación y sulfatación.

La espectroscopia infrarroja es única porque evalúa los componentes que constituyen la muestra de aceite a nivel molecular. Esta información es muy útil cuando se desea identificar la existencia de compuestos como aditivos y productos derivados de la oxidación.

La contaminación por agua, hollín, glicol, aceites de relleno incorrectos y solventes químicos puede monitorearse usando FTIR. El analista o el software buscan un pico espectral a frecuencias de absorción específicas llamadas números de onda (tabla 8-8). El hollín produce un cambio en el espectro de banda ancha, por ello se selecciona un número de onda en donde no ocurre ninguna actividad para la medición de hollín.

<b>Parámetro</b>	<b>Número de Onda (Cm<sup>-1</sup>)</b>
Oxidación	<ul style="list-style-type: none"><li>• Aceite mineral - 1750</li><li>• Éster orgánico – 3540</li><li>• Éster fosfatado – 815</li></ul>
Sulfatación	1150
Nitración	1630
Hollín	200
Agua	<ul style="list-style-type: none"><li>• Aceite Mineral - 3400</li><li>• Éster Orgánico</li></ul>
Glicol	3625, 880, 3400, 1040 y 1080
Combustible	<ul style="list-style-type: none"><li>• Diesel 800</li><li>• Gasolina 750</li><li>• Combustible de avión 795 - 815</li></ul>
Inhibidores de Fenol	3650
ZDDP antidesgaste/antioxidante	980

Tabla 8-8: Picos espectrales a frecuencias de absorción específicas llamadas números de onda.

### **8.6.2.6 Densidad ferrosa**

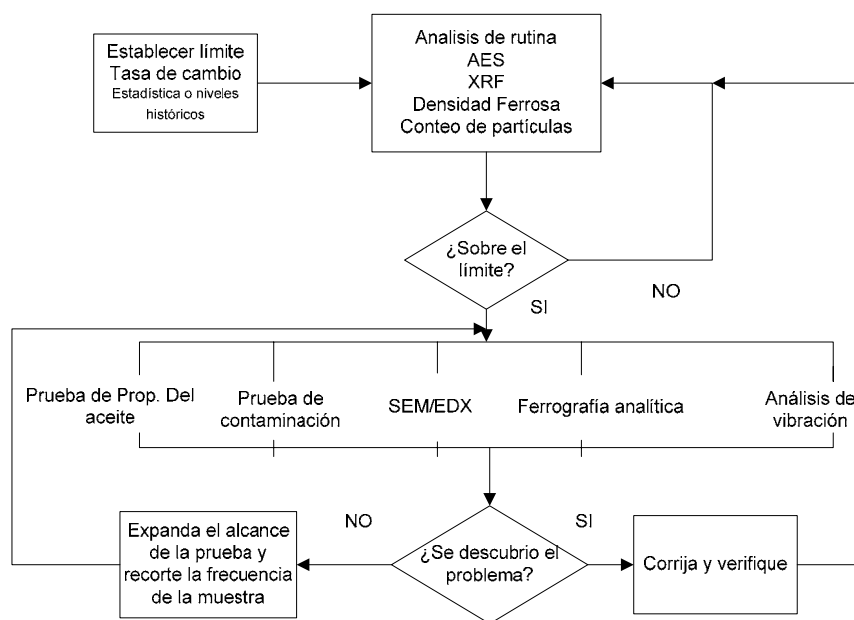
Un incremento en la población de partículas ferrosas grandes (>5 micrones) sugiere la presencia de condiciones de desgaste anormal y debe servir como una advertencia de falla inminente. Existen varios métodos disponibles para determinar la concentración de partículas ferrosas. La gravedad de la condición de desgaste generalmente es proporcional al aumento en la tasa de generación de partículas grandes. Las unidades de medición de densidad ferrosa reportadas varían según el proveedor del instrumento.

Un incremento en la generación de partículas ferrosas puede ser provocado por numerosos factores, incluyendo:

- ☞ Cambios en la carga a la maquinaria, provocados por aumento de producción
- ☞ Cargas excéntricas debidas a desbalanceo o desalineación
- ☞ Insuficiente lubricación causada por lubricante incorrecto, bajo volumen en el depósito/recipiente, agotamiento de aditivos o degradación del lubricante
- ☞ Contaminación por partículas, agua, aire, refrigerante, combustible, solventes, etc.
- ☞ Fatiga del componente y desgaste

Cuando se detecta desgaste anormal, aplicar el siguiente proceso de diagnóstico (refiérase al diagrama de flujo de la Fig. 8-20):

- ☞ Determine el origen de las partículas de desgaste mediante el muestreo en un puerto secundario.
- ☞ Determine la tasa de generación de desgaste para determinar la gravedad.
- ☞ Analizar las partículas de desgaste con ferrografía analítica y espectroscopia de elementos para determinar la gravedad del problema
- ☞ Utilizando el análisis de aceite y el análisis de vibración y demás información colateral se debe determinar la causa raíz.



**Fig. 8-20: Un proceso de diagnóstico para detectar desgaste anormal. Los siguientes pasos deberán incluir el análisis de las partículas de desgaste con pruebas complementarias para determinar su nivel de gravedad, naturaleza, origen y causa raíz.**



### **8.6.2.7 Ferrografía analítica**

Una prueba de diagnóstico por excepción. La ferrografía analítica implica el análisis de partículas de desgaste depositadas en un porta objetos para hacer un ferrograma o en una membrana para analizar el filtrograma. El análisis de la morfología de la partícula (forma), color, tamaño, capacidad de reflexión, apariencia de la superficie, detalle de los bordes, angulosidad, contenido de elementos y concentración relativa proporcionan al analista pistas acerca de la naturaleza, gravedad y causa raíz del problema de desgaste. A continuación se presenta un breve resumen del método de análisis de partículas microscópicas de desgaste:

- ☞ Las partículas se depositan en un portaobjetos de vidrio (ferrograma) o una membrana filtrante en forma de disco (filtrograma).
- ☞ Un instrumento llamado preparador de ferrograma, alinea las partículas ferrosas (y otros metales magnéticos) a lo largo de gradientes magnéticos en el portaobjetos de vidrio. Otras partículas tienden a asentarse gravitacionalmente (al azar) en el portaobjetos. El analista utiliza magnetismo para diferenciar las partículas (principalmente ferrosas contra no-ferrosas).
- ☞ El tratamiento térmico y/o químico adicional ayuda a establecer la metalurgia de las partículas en la muestra.
- ☞ Las partículas se evalúan con respecto a los efectos de la luz. Los materiales orgánicos y óxidos transmiten luz, mientras que las partículas metálicas la reflejan.
- ☞ El tamaño y forma de las partículas se evalúan para valorar qué mecanismo provocó su formación.

El analista de desgaste reporta comúnmente la presencia de numerosas partículas de desgaste, polímeros de fricción, tierra y arena, fibras y otros sólidos contaminantes en escalas de 1 a 10 o 1 a 100 para revelar gravedad, El texto descriptivo y microfotografías acompañan comúnmente los valores enumerados para aclarar confusiones y recomendar acciones correctivas.

Un incremento en la generación de partículas de desgaste puede ser consecuencia de numerosos factores, incluyendo:

- ☞ Incremento de cargas debido al aumento de velocidad de producción o incremento de producción.
- ☞ Cargas excéntricas causadas por mala alineación o desbalanceo.
- ☞ Lubricación insuficiente causada por lubricante incorrecto, bajo volumen en el depósito o contenedor, agotamiento de aditivos o degradación del lubricante.
- ☞ Contaminación por partículas, agua, aire, refrigerante, combustible, solventes, etc.
- ☞ Fatiga del componente y desgaste.

La ferrografía analítica, cuando se combina con pruebas de degradación de aceite, contaminación, análisis de vibración, termografía, etc., normalmente representa el punto terminal en la evaluación del análisis de aceite de un suceso anormal de desgaste previo a la falla. Es importante determinar la causa raíz del problema para que pueda eliminarse, evitando recurrencia de los síntomas.

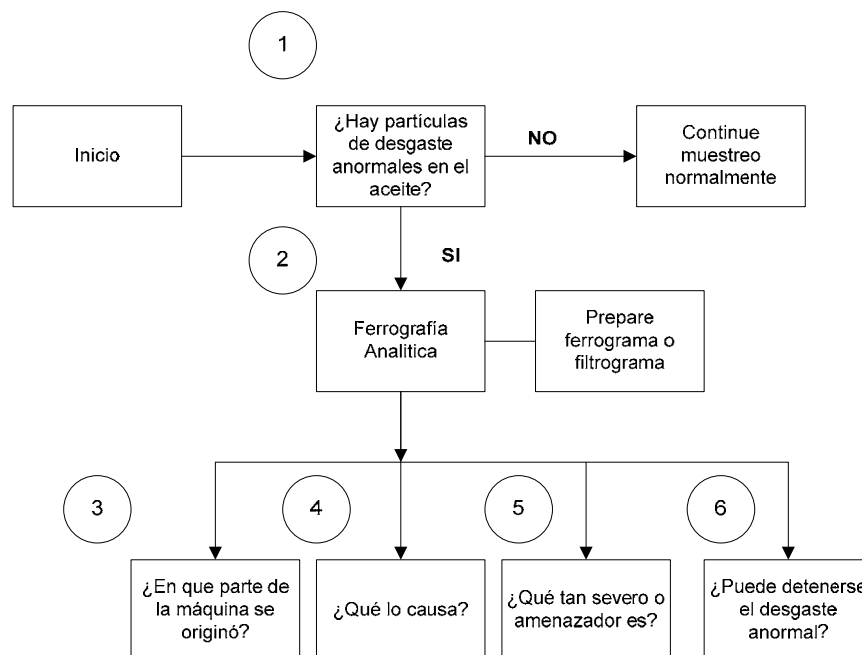


Fig. 8- 21: Diagrama de flujo para realizar un diagnóstico por ferrografía a una máquina.

Como se describe en el diagrama de flujo de la Fig. 8-21, el analista intenta responder las siguientes preguntas cuando realiza ferografía analítica:

- ☞ ¿En dónde se originó el desgaste?
- ☞ ¿Qué lo provocó?
- ☞ ¿Qué tan severo o potencialmente peligroso es?
- ☞ ¿Puede detenerse el desgaste anormal?

#### **8.6.2.8 Prueba de oxidación por recipiente rotatorio a presión (RPVOT)**

Este método de prueba utiliza una bomba presurizada por oxígeno (recipiente) para evaluar la estabilidad de oxidación de la muestra de aceite a alta temperatura en presencia de agua y un catalizador de cobre en espiral. La bomba se carga con oxígeno a una presión de 620 kPa (90 psi), se coloca en un baño de aceite a una temperatura constante de 150°C, y es girada axialmente a 100 rpm en un ángulo de 30°. Se compara entonces la cantidad de minutos requeridos para llegar a una caída de presión específica en el manómetro para el aceite en uso, con la cantidad de minutos que requiere un aceite nuevo de referencia. Un cambio significativo entre los valores del aceite nuevo y usado se relaciona con un cambio en la estabilidad de oxidación del aceite y su vida útil restante (RUL por sus siglas en inglés).

La degradación del aceite comienza con la formación de compuestos químicamente inestables derivados de los hidrocarburos los cuáles se oxidan rápidamente, originando una reacción en cadena. Los productos finales son resinas y lodo que se acumulan en las pistas de los rodamientos, enfriadores, cedazos, válvulas (causando atascamiento) y en el depósito de aceite. También puede provocar que se peguen las válvulas. Además, la oxidación puede incrementar la viscosidad del aceite y formar ácidos orgánicos complejos, lo cual puede resultar en un incremento en el número ácido.

Se considera normal una lenta disminución en la estabilidad de oxidación después de un largo periodo de servicio; sin embargo, no debe permitirse que avance mucho. El índice de oxidación del aceite puede aumentar rápidamente en presencia de las siguientes condiciones:

- ☞ Disminución de la capacidad del aceite de resistir la oxidación debida a la

remoción o agotamiento de aditivos anti-oxidantes.

- ☞ Aumento de las temperaturas del aceite o metal.
- ☞ Contaminantes como partículas metálicas y superficies metalizadas promueven la oxidación.
- ☞ Aumento en la cantidad de aire del aceite que trabaja con un nivel de aceite bajo o incremento en la presencia de agua.
- ☞ Incremento en la presión del aceite.

Si la vida oxidativa es normal no se requieren pruebas ni acciones adicionales. Si la vida oxidativa (RUL) es anormal (corta), Se debe considerar llevar a cabo las siguientes acciones correctivas:

- ☞ Reducir la tensión oxidativa (calor, aire, agua y metales reactivos).
- ☞ Mejorar la calidad del aceite básico.
- ☞ Mejorar el paquete de aditivos anti-oxidantes del aceite.
- ☞ Cambiar el aceite.

#### **8.6.2.9 Contenido de agua por Karl Fischer**

La prueba Karl Fischer se desarrolla comúnmente después de que la muestra es inspeccionada con la prueba de crepitación en plancha caliente o FTIR. Karl Fischer reporta el contenido de agua como concentración en porcentaje o en partes por millón (ppm) del agua “total” (libre y disuelta) en la muestra de aceite. En la prueba, el aceite es titulado con un reactivo Fischer estándar que contiene yodo a un punto final electrométrico. La exactitud de la prueba se ve afectada por la presencia de aditivos que contienen azufre como los agentes anti-desgaste, inhibidores de corrosión y agentes anti-rayado EP.

El agua corroe el hierro y superficies de acero, acelera la corrosión, agota y degrada los aditivos, promueve la oxidación del aceite básico y reduce la efectividad del lubricante. Grandes cantidades de agua forman emulsiones persistentes que al unirse con productos de oxidación insolubles forman lodo y pueden dañar de manera significativa la confiabilidad de

la máquina. Además, el agua libre puede causar la formación de depósitos duros quebradizos en las superficies de los cojinetes y promover el desarrollo de bacterias.

Las siguientes causas son responsables de un incremento en las concentraciones de agua:

- ☞ Relleno con aceite contaminado con agua.
- ☞ Deficiente operación del sistema de extracción de vapor.
- ☞ Fuga en los enfriadores de aceite.
- ☞ Fuga excesiva en los sellos de glándula de turbinas de vapor.
- ☞ Lavado por aspersión y escotillas mal cerradas.
- ☞ Condensación en el depósito.
- ☞ Si el alto contenido de agua es causado por contaminación accidental (con aceite nuevo) hay que revisar los procedimientos de relleno para evitar problemas similares en el futuro.
- ☞ Se debe asegurar que no existan fugas de aire a través de los sellos de la cubierta del depósito y que los ventiladores de extracción de vapor estén operando adecuadamente. Con respecto a los ventiladores, un vacío muy bajo puede provocar acumulación de humedad mientras que un vacío muy alto puede jalar hacia el interior más vapor o causar arrastre de aceite.
- ☞ Revisar en busca de fugas en los enfriadores de aceite. Para detectar fugas en los enfriadores, la descarga de agua de enfriamiento en los enfriadores también debe revisarse en busca de restos de aceite. Revise también su control de inventarios, por ejemplo, el aceite de relleno, debe revisarse para determinar si el uso de aceite ha sido superior al normal. Si no puede detectarse la fuga, aplique presión en el sistema en segmentos aislados y busque una caída de presión para indicar el área de fuga.
- ☞ Si se sospecha que los sellos de vapor de la turbina son la fuente de ingreso de agua, revisar la presión de entrada y de salida y regúlela según lo requiera cuando las condiciones lo permitan. Además, considere inspeccionar los sellos en la

siguiente revisión.

### **8.6.2.10 Espectroscopia de elementos**

La espectroscopia de elementos cuantifica la presencia de materiales inorgánicos disueltos y no disueltos por elemento. La mayoría de los espectrómetros usados en la actualidad para análisis de aceite son del tipo de emisión atómica. Esos instrumentos trabajan por la exposición de la muestra a temperaturas extremas generadas por un electrodo de alto voltaje o por plasma inductiva. El calor extremo volatiliza los átomos provocando que estos emitan energía en forma de luz. Cada elemento atómico emite luz a una frecuencia específica. El espectrómetro cuantifica la cantidad de luz generada a cada frecuencia y calcula la concentración de cada elemento (hierro, plomo, estaño, etc.) en partes por millón (ppm) o partes por billón (ppb).

La mayoría de los espectrómetros reportan la concentración de 15 o más elementos. Los elementos repollados pueden proporcionar un indicador de incremento en la generación de desgaste, ingreso de contaminación o agotamiento de ciertos elementos aditivos.

La espectroscopia de emisión atómica está limitada al tamaño de la partícula. Los metales disueltos y las partículas suspendidas de hasta aproximadamente 2 micrones se detectan con gran precisión. La precisión de detección disminuye según aumenta el tamaño de la partícula hasta 5 micrones. Las concentraciones de elementos pueden ser muy imprecisas para partículas mayores a 5 micrones.

El aumento o disminución en la concentración de elementos puede indicar un cambio en la generación de partículas de desgaste, el ingreso de contaminantes y la adición o agotamiento de aditivos. La tabla 8-9 en términos generales clasifica los elementos comunes observados con el análisis de aceite como desgaste, contaminación o aditivos.

<b>Elemento</b>	<b>Desgaste</b>	<b>Contaminación</b>	<b>Aditivo</b>
Hierro(Fe)	X	X	
Cobre(Cu)	X	X	X
Cromo(Cr)	X		

Estaño(Sn)	X		
Aluminio(Al)	X	X	
Plomo(Pb)	X		
Silicio(Si)		X	X
Sodio(Na)		X	X
Boro(Bo)		X	X
Calcio(Ca)		X	X
Magnesio(Mg)		X	X
Zinc(Zn)	X		X
Fosforo(P)		X	X
Molibdeno(Mo)			X
Potasio(K)		X	

**Tabla 8-9: Elementos comunes observados con el análisis de aceite producto del desgaste, contaminación o aditivos.**

Considerar la siguiente discusión al diagnosticar información anormal de concentraciones de elementos.

- ☞ Un aumento en la concentración de elementos tales como hierro, cobre, cromo, estaño, aluminio y plomo sugiere que está ocurriendo desgaste anormal. Los siguientes pasos deberán incluir el análisis de las partículas de desgaste con pruebas complementarias para determinar su nivel de gravedad, naturaleza, origen y causa raíz (Fig. 8-20).
- ☞ Un aumento en la concentración de silicio, sodio, boro, calcio y magnesio señalan el ingreso de contaminación. Un aumento constante en silicio y aluminio comúnmente sugiere ingreso de tierra, aún cuando el silicio es también el principal elemento encontrado en los aditivos anti-espumantes (silicón) lo cual puede provocar confusión en los resultados. El incremento en los niveles de sodio y boro puede señalar el ingreso de anticongelante base glicol (Fig. 8-22). El calcio y magnesio con frecuencia están presentes cuando se ingiere agua dura debido a aspersión o fugas en los sistemas de enfriamiento, pero también son elementos comunes encontrados en aditivos de aceites de motor.

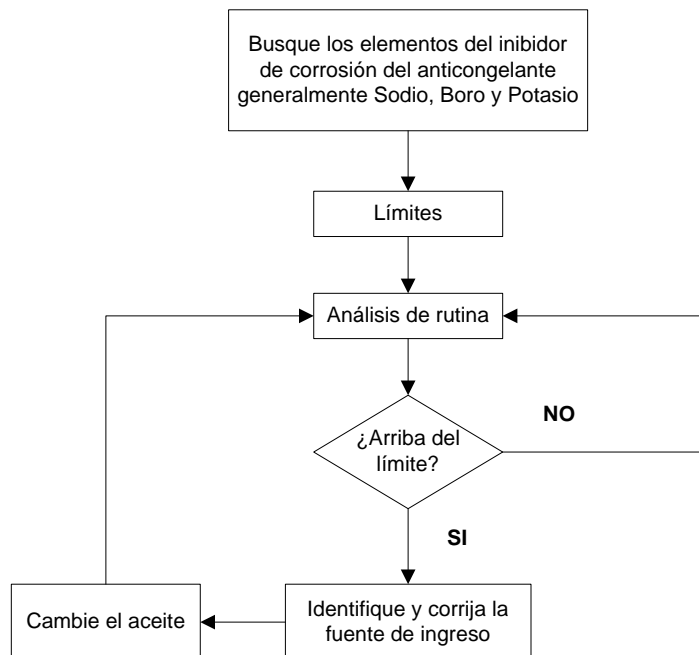


Fig. 8- 22: Diagrama que muestra la forma de realizar una inspección cuando se sospecha el ingreso de anticongelante base debido al incremento en los niveles de sodio y boro.

El conocimiento de la línea de base del aceite nuevo es decisivo para determinar la tendencia de agotamiento de aditivos con la espectroscopia de elementos (Fig. 8-23).

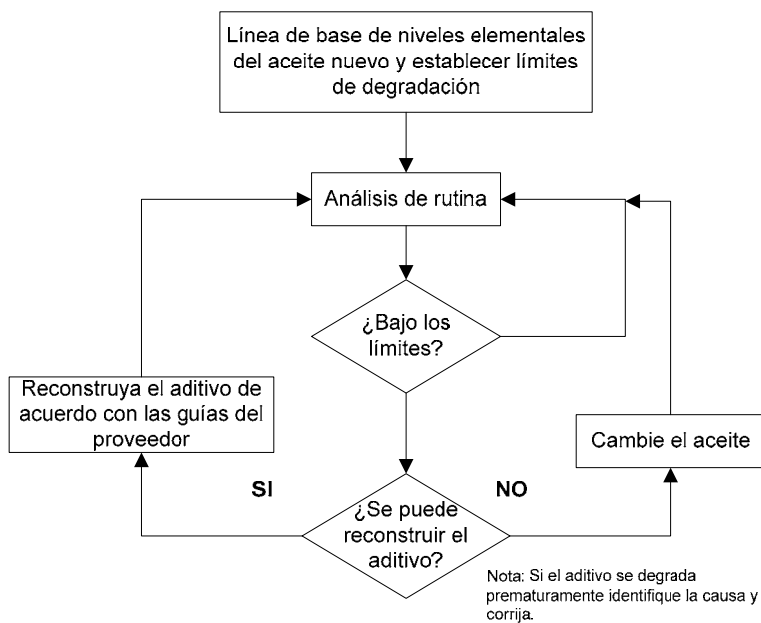


Fig. 8- 23: Secuencia típica para determinar si un aceite es reutilizable.



#### **8.6.2.11 Prueba del punto de flama**

El punto de flama identifica la presencia de moléculas volátiles del combustible y otros contaminantes inflamables. La prueba se realiza colocando el aceite en una copa colocada bajo una flama abierta (aplicada periódicamente). El aceite en la copa abierta se calienta gradualmente y se mide su temperatura. La temperatura a la que el fluido emite suficiente vapor mezclado con aire para producir una chispa en la superficie del aceite marca el final de la prueba. Muchos laboratorios simplemente realizan la prueba hasta una temperatura específica y reportan la información como pasa/no pasa.

Esta prueba es importante para aceites de motor ya que mide la cantidad de dilución de combustible en el aceite.

La dilución de combustible o químico daña gravemente la efectividad del lubricante y puede causar fuego o riesgo de explosión.

### **8.7 Objetivos, límites, diagnóstico y administración de información**

#### **8.7.1 Establecimiento de límites y objetivos**

A lo largo de la historia, los usuarios de análisis de aceite han confiado casi por completo en laboratorios comerciales de análisis de aceite o en el proveedor de aceite para identificar cuando una máquina está en alarma. Dándose cuenta de esta situación, las organizaciones de clase mundial están tomando el control sus propias señales de alarma para asegurarse de que se cumplan sus objetivos específicos. La reciente llegada de software sofisticado para análisis de aceite ha puesto este objetivo al alcance de cualquiera que lo desee.

El propósito principal de las alarmas, o límites, es filtrar la información para que los técnicos inviertan su tiempo en administrar y corregir situaciones excepcionales en vez de tener que examinar atentamente toda la información tratando de encontrar las excepciones. Las alarmas avisan al analista que se ha traspasado una puerta y que se requiere una acción. Algunos parámetros de información tienen solo límites superiores como los contadores de

partículas o niveles de partículas de desgaste. Unos cuantos parámetros de información emplean límites inferiores como BN, elementos de aditivos, punto de flama y FTIR (aditivo).

Otros parámetros de información como viscosidad y FTIR usan ambos límites, superior e inferior. Estos podrían relacionarse con importantes propiedades físicas y químicas del lubricante como su viscosidad.

Las técnicas de alarma varían para cumplir los requerimientos de objetivos diferentes de análisis de aceite.

**Alarmas Proactivas.** Las alarmas proactivas avisan al usuario acerca de condiciones anormales asociadas con el control de las causas de falla de la degradación del lubricante y de la máquina. Están ligadas a la filosofía del mantenimiento proactivo de establecer objetivos y administrar las condiciones del lubricante dentro de los mismos. Una premisa estratégica de las alarmas proactivas es que estas deben establecerse en niveles que generen mejoras con respecto al desempeño anterior, o que aseguren el mantenimiento de niveles en los que el desempeño haya sido optimizado con anterioridad en relación con los objetivos de la organización. En el área de las alarmas proactivas, utilizan los siguientes tipos de alarmas y límites.

☞ **Límites por objetivos basados en metas.** Los límites por objetivos se aplican al control de parámetros tales como contaminación para conseguir extensión de vida de la máquina (Fig. 8-24). Por ejemplo, una máquina hidráulica operando a nivel de limpieza ISO 20/18/15 experimentará tres veces la extensión de vida si el fluido se limpia a un nivel ISO 17/15/12. Establecer el límite a 17/15/12 es una actividad basada en meta. Por el contrario, si la misma máquina hidráulica está operando a ISO 17/15/12 y se pierde el control permitiendo que el nivel de contaminación alcance ISO 20/18/15, podemos esperar que el desgaste se triplique durante el período. El deseo de regresar el sistema a un ISO 17/15/12 es impulsado por un objetivo específico, y es, por lo tanto, un límite basado en meta. Este tipo de límite se aplica

comúnmente a conteo de partículas, nivel de humedad, contaminación con glicol, dilución por combustible, AN y otras condiciones comunes de causa de falla.

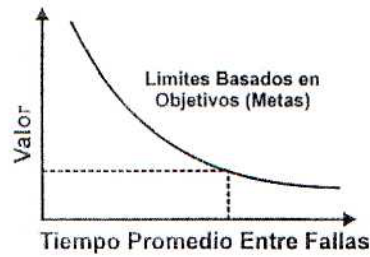


Fig. 8- 24: Límites por objetivos basados en metas.

☞ **Límites de envejecimiento.** Otro tipo de límite o alarma proactiva se relaciona con el envejecimiento progresivo de un lubricante o un fluido hidráulico (Fig. 8-25). Desde el momento en que un fluido se pone en servicio, sus propiedades físicas y químicas sufren una transformación alejándose del ideal (esto es, las del aceite formulado nuevo). Algunas propiedades son de transición muy lenta, mientras que otras tienen una transición muy dinámica. Los límites atribuidos a los síntomas de deterioro del lubricante se conocen como límites de envejecimiento. Los límites de envejecimiento pueden aplicarse con efectividad a parámetros como AN/BN, viscosidad, RPVOT, espectrometría de elementos para los aditivos, FTIR (oxidación, nitración, sulfatación y aditivos), y constante dieléctrica. La tabla 8-10 muestra algunos ejemplos de límites para ambos parámetros, basados en metas y de envejecimiento.

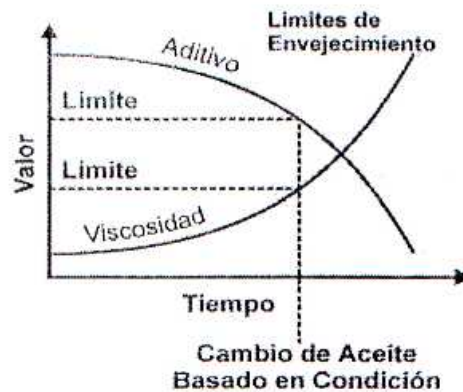


Fig. 8- 25: Envejecimiento progresivo de un lubricante o un fluido hidráulico.

Límites objetivos/meta (Sup)			Límites de envejecimiento		
	Alerta	Crítico		Alerta	Crítico
Limpieza	16/14/11	18/16/13	Viscosidad	5%	+10%
Humedad	200	600	RPVOT	-30%	-60%
AN	0.2	0.4	FTIR-OX	0.3	1.0
Combustible	1.5%	5%	Zinc	-15%	-30%
Glicol	200 ppm	400 ppm	Calcio	-10%	-20%
Hollín	2%	5%	BN	-50%	-75%

Tabla 8-10: Ejemplos de límites para parámetros basados en metas y de envejecimiento.

**Alarmas Predictivas.** Las alarmas predictivas marcan la presencia de condiciones anormales de máquina o el comienzo de desgaste y falla. Están alineados con las metas de mantenimiento predictivo, esto es, la detección temprana de síntomas de falla de la máquina en vez de las causas raíz de la falla (mantenimiento proactivo). En el análisis de aceite, el establecimiento adecuado de una alarma predictiva tiene muchas ventajas sobre las otras tecnologías de mantenimiento predictivo, y como tal, representa un complemento excelente para el análisis de vibración, la termografía, etc. Dentro del ámbito predictivo, utilizamos las siguientes técnicas de alarma para el análisis de aceite.

**Alarmas basadas en tasa de cambio.** Las alarmas de tasa de cambio se establecen comúnmente para medir las propiedades que están siendo introducidas progresivamente en el aceite, como las partículas de desgaste. La tasa de incremento (cambio) puede calcularse por unidades de tiempo, horas, ciclos, etc. Por ejemplo, un incremento de 100 ppm de hierro en un periodo de operación de 100 horas puede definirse como 1 ppm por hora de operación. Cuando el parámetro se establece por tiempo, la tasa de cambio (tasa de incremento) es igual a la tendencia real de la curva (Fig. 8-26). A diferencia de los límites de nivel, los límites de tasa de cambio ignoran el valor absoluto de los parámetros de información, enfatizando en su lugar la velocidad a la que está cambiando el nivel. Los límites de tasa de cambio son aplicados con efectividad al conteo de partículas (sistemas sin filtro), desgaste de elementos

metálicos, densidad ferrosa, AN y RPVOT. También puede aplicarse efectivamente para monitorear degradación anormal de aditivos con espectrometría de elementos y FTIR.

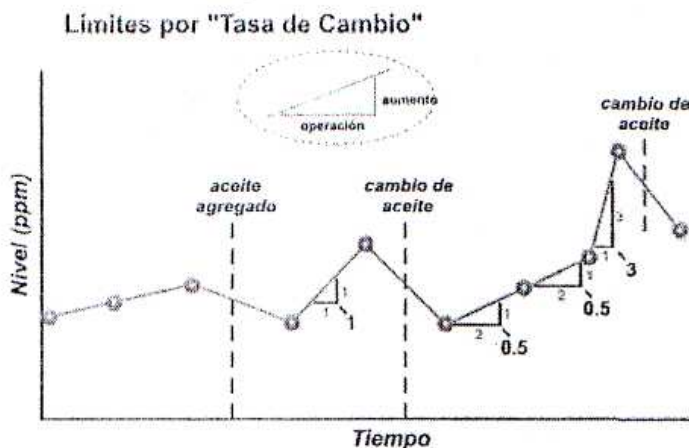


Fig. 8- 26: Tendencia cuando se establece un parámetro en función del tiempo, como lo es la tasa de cambio (tasa de incremento).

☞ **Alarmas estadística.** Por muchos años, las alarmas estadísticas se han utilizado con efectividad para análisis de aceite. La práctica requiere la disponibilidad de una cantidad suficiente de información específica de la máquina y la aplicación para obtener esas valiosas conclusiones. El enfoque de las alarmas estadísticas es simple (Fig. 8-27). Se genera la media de población (promedio) y la desviación estándar asociada a partir de la información disponible. La información de la muestra se compara con la media de la población. Si el valor cae dentro de la media más una desviación estándar, se considera normal. Si cae fuera de la media más una desviación estándar, pero dentro de dos desviaciones estándar, se considera un aviso de precaución. Si el resultado excede de 2 desviaciones estándar el valor se considera una alarma crítica puesto que es mayor, o menor según sea el caso, que el 95% de la población. Si el valor pasa de tres desviaciones estándar, eso será verdaderamente una situación crítica, ya que el valor excede el 99 por ciento de la población.

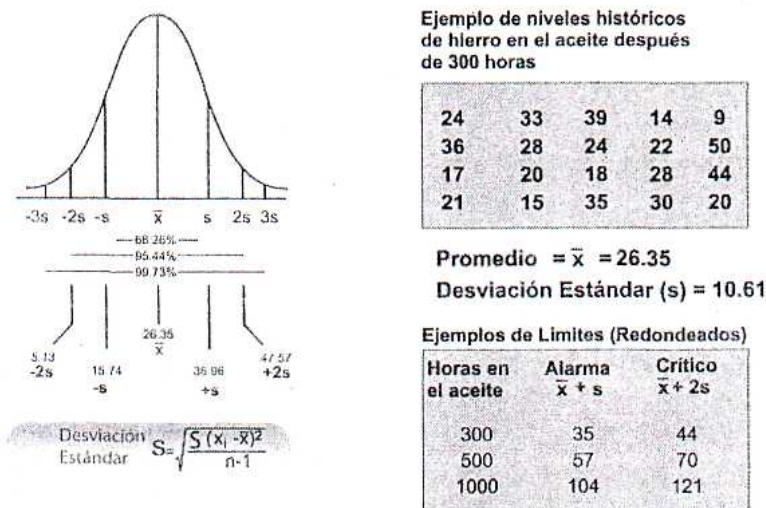


Fig. 8- 27: Enfoque de las alarmas estadísticas para su implementación se requiere de información específica de la máquina.

La tabla 8-11 tabula en términos generales la aplicabilidad de diferentes técnicas para establecimiento de objetivos y alarmas para pruebas específicas de análisis de aceite. También identifica si el objetivo o alarma es superior, inferior o ambos.

Los métodos de alarma estadística se aplican comúnmente a densidad ferrosa, elementos atómicos de metales y otras mediciones predictivas de análisis de aceite. Si bien es muy útil para el análisis, la información estadística puede dar como resultado falsos positivos y negativos debido a una mala estratificación de la información con respecto al tipo de máquina, su aplicación y entorno de operación.

	Basado en objetivo	Basado en edad	Basado en tasa de cambio	Basado en estadística
1. Conteo de partículas	S	-	P	S
2. Viscosidad				
a) A 400C	S,L	S,L	-	-
b) 1000C	S,L	S,L	-	-
3. AN	L	S	P,N	S,L
4. FTIR				

a.Ox/Nit/Su	-	S	P	S
b.Fenol	-	L	N	L
c.ZDDP	-	L	N	L
d.dilución por comb/hollín	-	S	P	S
e.Agua	S	-	P	P
5.Densidad ferrosa	-	-	P	S
6.ferrografía analítica	-	-	-	-
7.RPVOT			N	L
8.Agua por Crepitación	S	-	-	-
9.Agua por KF	S	-	P	
10.Separabilidad del agua	-	L	-	-
11.Análisis de elementos				
a.Metales de desgaste	-	-	P	S
b.Contaminantes	S	-	L	S
c.Aditivos	-	L	L	L,S
Leyendas: S=Límite superior L=Límite inferior P=Inclinación Positiva N=Inclinación Negativa Nota: Cuando las alarmas son bi-polares, el mostrado primero es el más importante.				

Tabla 8-11: Tabulación en términos generales de la aplicabilidad de diferentes técnicas para establecer de objetivos y alarmas para pruebas específicas de análisis de aceite.

### 8.7.2 Interpretación y aplicación de resultados de análisis de aceite.

La interpretación de información del análisis de aceite requiere de la comprensión de las pruebas específicas como se describe en la sección 8.6, y entender cómo éstas se interrelacionan cuando cambian las condiciones del aceite y de la máquina. Refiérase a la

tabla 8-12 durante la discusión de indicadores primarios y secundarios del análisis de aceite para condiciones típicas anormales.

Prueba de Análisis de Aceite	Condiciones de Maquinaria/Lubricante													
	Contaminación por partículas	Detección de partículas	Análisis de partículas	Viscosidad Anormal	Contaminación por humedad	Agotamiento de aditivos	Estabilidad a la oxidación	Contaminación por glicol	Dilución por combustible	Hollin	Reserva alcalina	Aceite incorrecto	Falla térmica	Condiciones correctivas
Conteo de partículas	P	S	S											
Viscosidad				P	S		S	S	S	S		P	P	S
AN/BN				S		S	P				P	S	S	P
Espectroscopia por FTIR				S	P	P	P	S	P	P		P	P	P
Densidad ferrosa		P	S											
Ferrogafia analítica	S		P											
RPVOT							P					S	S	
Probadores de humedad					P									
Espectroscopia de elementos	S	P	P		S	P		P	S			P		
Prueba de punto de flama				S					P			S	S	

Tabla 8-12: Indicadores primarios y secundarios del análisis de aceite para condiciones típicas anormales.

### 8.7.2.1 Contaminación por partículas

Una alarma en contaminación por partículas avisa de un incremento de las partículas suspendidas en el aceite, provocado por eventos tales como la falla de un filtro, ingreso de contaminantes del medio ambiente a través de los sellos, ventilas, aceite nuevo o a un incremento en la generación de partículas de desgaste.

#### Pruebas principales:

☞ *Conteo de partículas.* Un contador de partículas provee la indicación más clara de partículas contaminantes sólidas. Se grafica la tendencia de códigos ISO o conteo de partículas contra los objetivos predeterminados de niveles de limpieza.



**Pruebas secundarias:**

☞ **Espectroscopia de elementos.** Con frecuencia, al aumentar el conteo de partículas, aumentan los niveles de elementos presentes. En contaminación de aceite por tierra, aumentan el silicio y el aluminio ya que éstos son los principales componentes de la corteza terrestre. Igualmente, los metales de desgaste pueden incrementar dependiendo de la metalurgia de los componentes de falla si la máquina está experimentando desgaste anormal. Se debe observar, sin embargo, que la espectroscopía de elementos produce frecuentes falsos negativos debido a que las partículas con frecuencia son muy grandes para ser medidas con efectividad por el instrumento.

☞ **Ferografía analítica.** Aunque es muy cara y consume mucho tiempo, depositar las partículas en una membrana o placa de cristal y observarlas con un microscopio revelará un aumento en el conteo de partículas. La cuantificación de las partículas con el uso de esta técnica es limitada.

### **8.7.3 Análisis de campo (en sitio)**

**Métodos de Campo:**

- **Análisis de membrana**

- *Método comparativo.* Implica la comparación del color y la densidad de la membrana actual con membranas estándar

- *Método de microscopio de campo.* Requiere de la inspección de las partículas con un microscopio de campo (similar a icnografía analítica)

#### **8.7.3.1 Detección de partículas de desgaste**

Cuando las máquinas operan anormalmente por desbalanceo, o desalineación, falla de lubricación, contaminación, condiciones corrosivas, etc., la máquina envía mensajes dentro del aceite en forma de partículas de desgaste. El análisis de aceite proporciona avisos muy

tempranos de estos acontecimientos y amplía el tiempo de planeación y el número de opciones con las cuales corregir el problema.

**Pruebas Principales:**

- ☞ ***Densidad ferrosa.*** La medición del incremento en la producción de partículas ferrosas es una buena indicación de una situación anormal debido a que muchos de los componentes de la máquina están fabricados en hierro o acero. Esas pruebas ignoran las partículas de desgaste no magnéticas generadas por metales como latón, bronce, aluminio, plomo, estaño y superficies de acero inoxidable.
- ☞ ***Espectroscopia de elementos.*** Un aumento en el nivel de elementos atómicos de metales indica la presencia de una condición anormal. Y, al comparar los resultados con los registros de metalurgia de los componentes, se puede determinar la condición anormal. La espectroscopia de elementos convencional está limitada al tamaño de las partículas y con frecuencia produce falsos negativos por partículas de desgaste ya que éstas se corroen o desintegran en partes muy pequeñas o se disuelven.

**Pruebas Secundarias:**

- ☞ ***Conteo de partículas.*** Cualquier desgaste que se genere dará como resultado un aumento en el conteo de partículas. El conteo de partículas no hace una separación entre las partículas ingeridas como la tierra, y las partículas de desgaste generadas.

**Método de Campo:**

- ☞ ***Método de membrana magnética.*** Requiere el uso de un magneto para preparar selectivamente una membrana.

### **8.7.3.2 Análisis de partículas de desgaste**

Cuando se encuentra una condición anormal de desgaste, ésta debe ser analizada para obtener indicios de la naturaleza, gravedad y causa raíz del problema, esto requiere que se investiguen estas partículas de desgaste al mismo tiempo que se hace una revisión de la información colateral como la del análisis de vibración, información operacional, análisis de aceite, etc.

### **8.7.3.3 Viscosidad anormal**

La viscosidad puede aumentar en respuesta a un gran número de razones, entre las más comunes se encuentran: la oxidación, falla térmica, contaminación por agua/glicol, exceso de hollín y aceite incorrecto. Aspectos como la dilución por solvente o combustible, corte de los mejoradores de IV (aditivos) y del básico y fraccionamiento del aceite básico, son causa de reducción de la viscosidad.

### **8.7.3.4 Contaminación por humedad**

La humedad en todas sus formas trae consigo sólo problemas al lubricante y a la máquina. Corroe las superficies de hierro y acero, incita la corrosión en otras superficies metálicas y con el tiempo puede destruir al lubricante. La humedad puede entrar al aceite por muchos lugares. La tarea de encontrar su origen puede ser muy complicada pero es aún más importante controlarla.

### **8.7.3.5 Agotamiento de aditivos**

Los aditivos se encuentran entre los parámetros más difíciles de medir utilizando el análisis de aceite. Los aditivos existen como compuestos orgánicos, inorgánicos o compuestos órgano-metálicos, que mejoran el desempeño del básico. Frecuentemente, es más fácil evaluar sus características de desempeño que el aditivo mismo. Sin embargo, es posible estimar la vida útil restante del paquete de aditivos utilizando técnicas convencionales de análisis de aceite.

### **8.3.7.6 Estabilidad de oxidación**

La estabilidad de oxidación es un indicador de la duración de la capacidad del aceite a resistir la oxidación (una forma común de degradación del aceite). El calor y la contaminación con el paso del tiempo deterioran la resistencia del aceite a la oxidación. Algunas pruebas de análisis de aceite miden los sub-productos de la oxidación, mientras que otros intentan medir la capacidad del aceite para resistir la oxidación.

### 8.7.3.7 Contaminación por glicol

El glicol (contenido en el anticongelante) se introduce en el aceite por el enfriador. Fugas por corrosión, falla de sellos, daño en el enfriador y cavitación son las causas más comunes de contaminación por glicol. El glicol es extremadamente dañino para el lubricante (induce la oxidación y la formación de depósitos), sus aditivos (forma bolas de aceite abrasivas), filtración (tapa los poros prematuramente) y al motor (corrosión, desgaste, etc.). Con tanto en riesgo, es obligatorio llevar a cabo la rutina de monitoreo en busca de rastros de contaminación por glicol.

El método reactivo Schiff, es un procedimiento colorimétrico utilizado en campo y en el laboratorio. Si existe anticongelante en el aceite, habrá un cambio en el color producido por el cambio químico del aceite contaminado por glicol al ser mezclado con el reactivo Schiff. (Fig. 8-28). El procedimiento se describe en ASTM D2982.

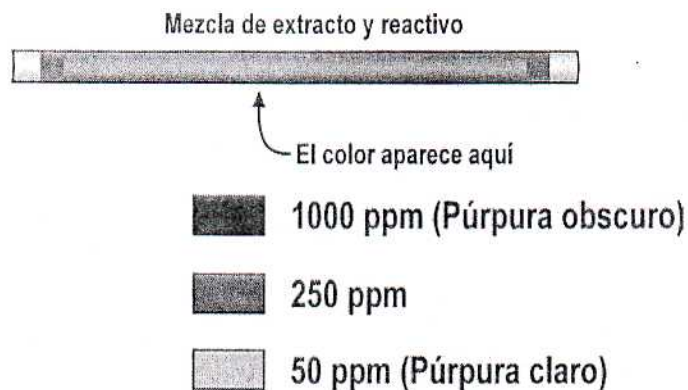


Fig. 8- 28: El método reactivo Schiff, se utiliza en busca de rastros de contaminación por glicol.

### 8.7.3.8 Dilución con combustible

El combustible generalmente entra al cárter como un subproducto de combustión incompleta (gases de combustión) o por una fuga. De cualquiera manera, la afectación que produce el combustible en la lubricación puede ser importante. Por ejemplo, tan sólo un 10 % de dilución de combustible puede ser suficiente para reducir una viscosidad SAE 30 a una

SAE 20. La reducción de la viscosidad del aceite puede alterar críticamente el espesor de la película lubricante en los componentes del motor. Además, el combustible diluye las concentraciones de los aditivos. Si se encuentran niveles excesivos de combustible (arriba de 3%) se debe buscar el origen del combustible y remediarse.

### **8.7.3.9 Contaminación con hollín y dispersancia**

El hollín entra al aceite de motor por fuga de gases de combustión. Cuando existen intervalos de drenado de aceite demasiado largos, entran cantidades excesivas de hollín, los filtros de aire se saturan, los empaques o arillos se desgastan y/o suceden condiciones de exceso de combustible en la mezcla. Al acumularse el hollín en el aceite, el desempeño de éste puede degradarse hasta el punto en que eventualmente la lubricación sea deficiente, dando como resultado la formación de lodos y depósitos. La carga de hollín y la calidad de dispersancia de hollín (influenciada por aditivos) tienen mucho con respecto a la determinación del momento oportuno para realizar un cambio de aceite basado en condición para aceites de motor. Por el contrario, cuando los lubricantes se cambian en base a tiempo o programación, hay menos necesidad de llevar a cabo una rutina de monitoreo de la carga de hollín y dispersancia. Se considera que la dispersancia se afecta cuando las partículas de hollín se coagulan, formando suspensiones de carbón mayores que un micrón. Dependiendo del grado del aceite, las concentraciones de hollín en un rango de 2 - 5% normalmente son señaladas como anormales.

Colocando un par de gotas de aceite en papel secante común (puede utilizar papel Wathman #4) o una tarjeta de presentación, se puede realizar una evaluación cualitativa de contaminación del aceite con glicol. Deje que el aceite se extienda en el papel secante por lo menos durante un par de horas (Fig. 8-29). Además de la carga de hollín, la aparición de una estructura anular bien definida (anillos, halos, mancha oscura en el centro, etc.) señalan pérdida de dispersancia. El procedimiento de la gota para evaluar dispersancia se realiza comúnmente en laboratorios de análisis de aceite.

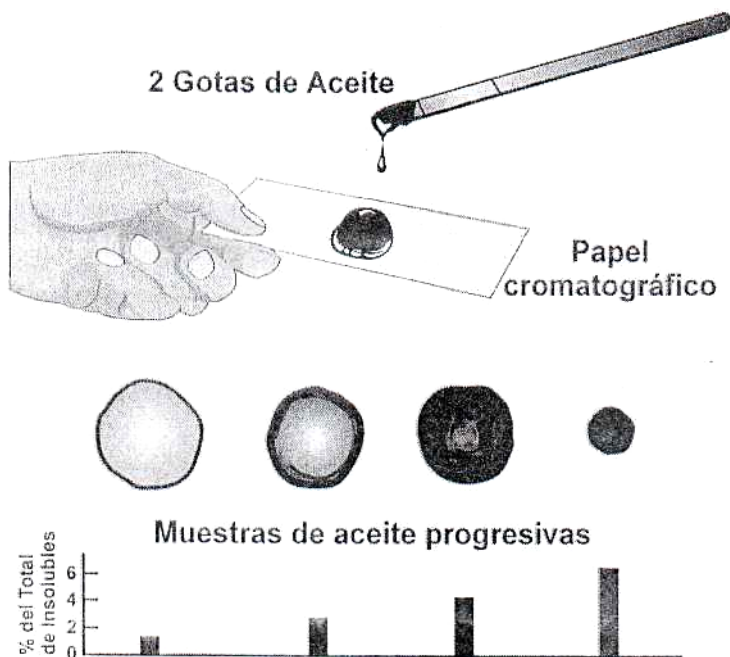


Fig. 8- 29: El procedimiento de la gota para evaluar dispersancia.

### 8.7.3.10 Reserva alcalina

El monitoreo y control de la reserva alcalina de aceites de motor es la clave de cualquier estrategia de drenado de aceite extendido basado en condición. Ciertos aditivos, como los detergentes, contribuyen con la alcalinidad original del aceite nuevo. Estos aditivos en esencia, proporcionan una propiedad antiácida (por neutralización) a la formulación resultante en el combate a los ácidos que se forman por la combustión y oxidación. Ciertos combustibles (altos en azufre por ejemplo) y condiciones de operación (climas fríos, viajes cortos, etc.) contribuyen a la pérdida de reserva alcalina. El alto nivel de fuga de gases de combustión en motores gastados también puede generar condiciones corrosivas.

### 8.7.3.11 Aceite incorrecto

Una de las condiciones anormales más comunes detectadas por el análisis de aceite, es el uso de aceite incorrecto o que no cumple con las especificaciones. Esto puede ocurrir durante el cambio de aceite, al agregar aceite de relleno, o con tratamientos de nivelación de aditivos. En muchas aplicaciones, el uso de un aceite incorrecto es tan perjudicial como lo es uno defectuoso o contaminado. Por lo tanto, el conjunto de pruebas de análisis de aceite debe tener la capacidad de reconocer bien aquellos lubricantes en uso que sean incorrectos o que no cumplan con las especificaciones.

### 8.7.3.12 Falla térmica

Los lubricantes pueden degradarse térmicamente por una variedad de causas y razones. A diferencia de la oxidación, la falla térmica puede ocurrir en lubricantes nuevos con paquetes de aditivos sanos. Sin embargo, muchos de los síntomas de oxidación también son síntomas de degradación térmica. Una de las causas más comunes de falla térmica en fluidos hidráulicos y en algunos aceites lubricantes se relaciona con la aereación, esto es, burbujas de aire atrapadas. Esas burbujas pueden comprimirse rápidamente en bombas hidráulicas y las zonas de compresión de los cojinetes. Esto da como resultado altas temperaturas localizadas (compresión adiabática) provocando la súbita formación de partículas finas de carbón (Fig. 8-30). La carbonización en superficies calientes es otra forma de falla térmica. Al degradarse térmicamente un aceite, con frecuencia ocurrirán problemas relacionados con la formación de lodo, barniz, depósitos, cambio de viscosidad y descomposición de aditivos.

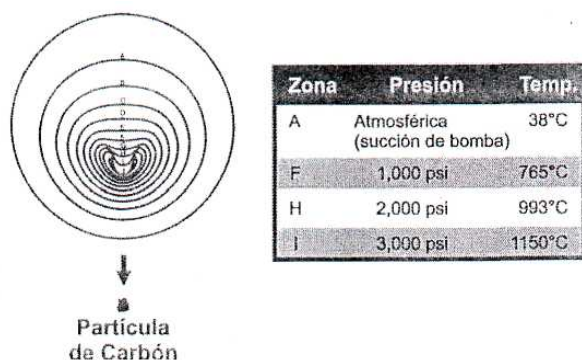


Fig. 8- 30: Falla térmica en fluidos hidráulicos; la carbonización en superficies calientes es otra forma de falla térmica.

### **8.7.3.13 Condiciones corrosivas**

Un lubricante puede tornarse corrosivo a causa de la contaminación con ácidos o a la formación de ácidos por medios oxidativos. Por ejemplo, los ácidos nítricos y sulfúricos pueden producirse por la fuga de gases de combustión en aceites de motor. Los ácidos fosfóricos pueden provenir de la ruptura de aditivos y por contaminación. Otros contaminantes corrosivos incluyen ácidos clorhídricos y fluorhídricos. Sin importar la fuente o modo de formación de ácidos el riesgo es real y requiere monitoreo en la mayoría de las aplicaciones. El reconocimiento y corrección de las condiciones corrosivas de lubricación puede evitar reparaciones muy costosas y pérdidas de producción.

### **8.7.4 Documentación y reporte de resultados del análisis de aceite**

Existen dos razones específicas por las cuales se deben documentar los resultados de análisis de aceite. Primero porque una documentación adecuada mejora la calidad técnica del programa de análisis de aceite, por tanto, mejoran la efectividad de las decisiones y operaciones de mantenimiento. También, el reportar bien los resultados del análisis de aceite puede facilitar la justificación financiera de proyectos, al identificar la tendencia del desempeño para reconocer las mejoras en la productividad resultantes de la administración efectiva de lubricación y/o análisis de aceite. Un buen programa de administración de información del análisis de aceite tiene las siguientes características:

- ☞ Software que ponga al usuario al mando de la información y que mantenga un registro permanente de la información y actividades “en casa”.
- ☞ Apoyo en las actividades de pruebas “en-sitio”.
- ☞ Descarga electrónica de información generada por el laboratorio.
- ☞ Tiene una arquitectura abierta que no lo ata a un laboratorio o proveedor de aceite específicos.
- ☞ Proporciona rutas electivas y capacidad de administración de trabajo.
- ☞ Tiene capacidad de elaboración de formatos de reportes que puede definir el usuario.
- ☞ Integra notas de diagnóstico para mantener un historial de actividades.



- ☞ Cualquier persona que requiera la información puede tener acceso a ella, con la adecuada asignación de autorización.
- ☞ Puede trabajar como un programa de mono - usuario, o puede operarse en un sistema de red LAN o WAN.
- ☞ Es fácil de aprender y usar.

La información debe tener un formato fácil de entender y usar para facilitar un profundo análisis. La gente tiende a preferir la representación de la información en forma gráfica, en vez de simples datos de texto o numéricos. Estas herramientas permiten la compresión de grandes cantidades de información o valores derivados, que serán vistos de manera eficiente para análisis. La información del análisis de aceite se reporta y analiza generalmente en una combinación de tipos de presentación de información descritas abajo.

- ☞ ***Información de una sola muestra, con parámetros múltiples.*** A menudo, necesitamos analizar múltiples parámetros de información de una sola muestra con el fin de sacar conclusiones significativas. Un ejemplo es el espectro de elementos donde los elementos individuales se definen en una coordenada de una tabla o gráfico de barras, y la amplitud se define en la otra coordenada. Las tablas y gráficos de barras son los métodos de presentación de información usados con más frecuencia para reportar información de una sola muestra con parámetros múltiples.
- ☞ ***Información de un solo parámetro en varias muestras.*** Otras veces, necesitamos revisar el desempeño de un solo parámetro en relación con el tiempo. Este es un gráfico de tendencia con el tiempo definido en el eje de las X, y la amplitud del parámetro de interés definido en el eje de las Y. Esta presentación de información, permite el análisis con respecto a límites absolutos, relativos o estadísticos, y mantiene la tasa de cambio basada en mecanismos de alarma.
- ☞ ***Gráficos de información X vs. Y.*** Ocasionalmente, queremos revisar el desempeño de una variable relativa con otra para identificar una tendencia visual, o para calcular un coeficiente de correlación. Por ejemplo, el ZDDP actúa para mejorar la lubricidad aparente de un fluido por reducción de las fuerzas potenciales de fricción. Un análisis de los niveles de zinc vs. los niveles de hierro podría indicar una correlación que nos ayudaría a optimizar la especificación, intervalos de cambio o programar el

reacondicionamiento del fluido. La representación gráfica de información X vs. Y da apoyo a este tipo de análisis sofisticado.

### **8.7.5 Integración del análisis de aceite con otras técnicas de monitoreo de condición**

El análisis de aceite no debería enfrentarse solo a las fallas y a la pobre confiabilidad de la maquinaria. La historia ha comprobado que se obtienen numerosos beneficios al utilizar tecnologías complementarias para la detección de condiciones anormales en la máquina y para la administración de importantes causas de falla como el desalineamiento y el desbalanceo. Algunos de los complementos más usados en el análisis de aceite incluyen:

- ☞ **Análisis de vibración**
- ☞ **Termografía y termometría**
- ☞ **Análisis ultrasónico**
- ☞ **Evaluación de corriente de motores eléctricos**

## 9. Vibraciones mecánicas

### 9.1 Introducción

Por décadas el mantenimiento predictivo basado en la condición de funcionamiento de los equipos, específicamente el análisis de vibraciones mecánicas, ha sido ampliamente utilizado para detectar problemas en maquinarias.

Las vibraciones mecánicas, es un buen parámetro para poder determinar la condición de funcionamiento de una máquina o de los elementos que la componen. Todas las máquinas vibran y cada una tiene un patrón normal de funcionamiento. A través del análisis de vibraciones, se logra identificar un funcionamiento fuera del rango normal de vibración correspondiente a una falla potencial en los equipos e inclusive precisar la causa raíz de ese problema.

El análisis de vibraciones es una herramienta fundamental en un programa de mantenimiento predictivo, permitiendo reducir costos de mantenimiento, paros inesperados, pérdidas de producción y aumentando la disponibilidad de los equipos.

### 9.2 Principios básicos

#### 9.2.1 Vibración

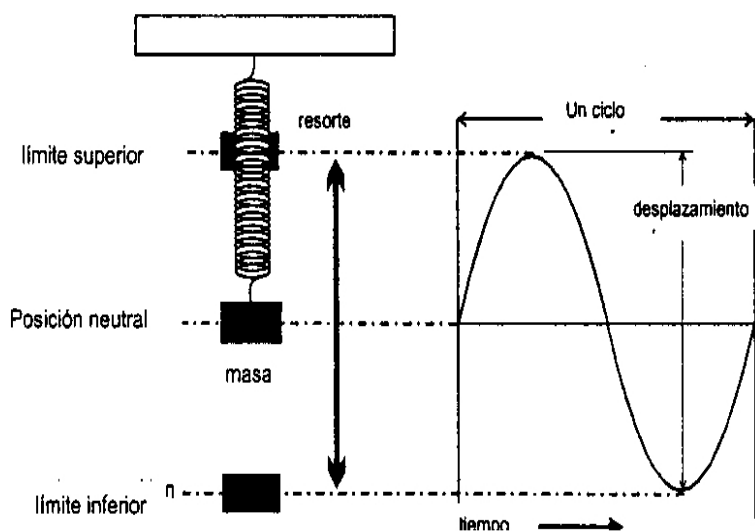


Fig. 9-1: sistema masa resorte.

En un ciclo de movimiento, la masa oscilante sube y baja, pasando por su posición de reposo.

Las vibraciones en máquinas se producen por el movimiento oscilante de los componentes mecánicos (alrededor de su punto neutro), y como resultado de la reacción a fuerzas internas o externas. En el ejemplo (Fig. 9-1), el conjunto masa resorte, actúa como el sistema vibratorio de una máquina.

Observando la oscilación como una función del tiempo, la posición de un punto genera una onda senoidal. El punto de inicio (cuando la masa esta en reposo) es el punto 0 (cero). Un ciclo completo de la masa muestra un desplazamiento positivo y otro negativo respecto a la referencia 0.

El desplazamiento es el cambio de distancia o posición de un objeto, relativo a su referencia. La magnitud del desplazamiento es denominada “amplitud”. Cuanta mayor amplitud posee la señal vibratoria, esta es más severa.

### **Detección**

Se mide la vibración de los componentes de la máquina o de la estructura, comparándose luego el nivel de vibración con su valor normal. Esto indica el estado actual de la máquina y su evolución en el tiempo. Si el nivel de vibración aumenta, normalmente hay avería.

### **Análisis**

Cada problema mecánico o defecto genera vibraciones en forma particular. Se utiliza herramientas de análisis para investigar el tipo de vibración, y de esta manera identificar el defecto y su causa raíz. Corrigiendo ésta se evita que el problema se repita.

#### **9.2.2 Definiciones**

A través de la Fig. 9-2 se pueden definir los parámetros que definen a una onda de vibración a saber:

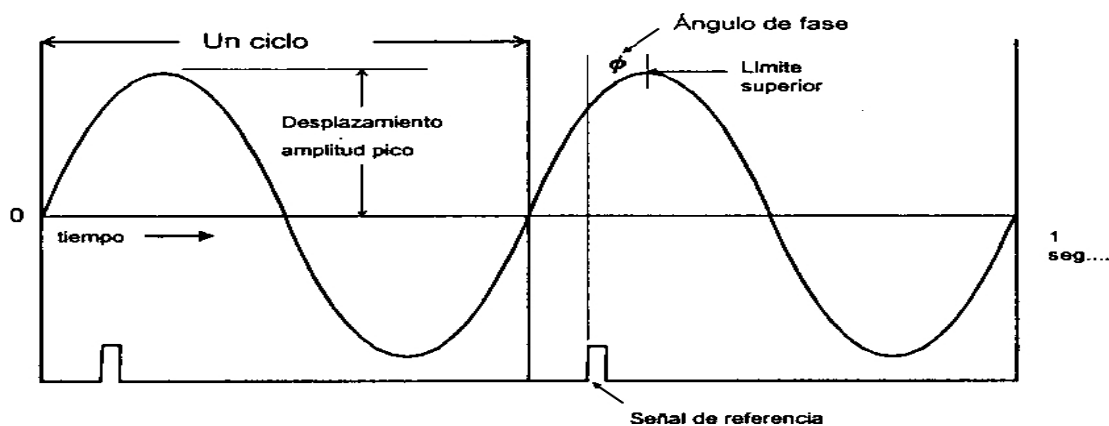


Fig. 9-2: definición de parámetros.

**CICLO:** Es el período de tiempo entre puntos repetitivos de una onda periódica. En el ejemplo de la Fig.- 2, el ciclo o periodo es de 0.5 seg.

**FRECUENCIA:** Es el número de ciclos de la vibración que ocurren en un periodo de tiempo determinado. La frecuencia es el recíproco del período.

$$F = \frac{1}{T} \quad \text{En el ejemplo de figura 2} \quad F = \frac{1}{0.5} = 2 \frac{\text{ciclos}}{\text{seg.}}$$

La unidad de medida de la frecuencia es Hertz (Hz)

$$1\text{Hz} = 1\text{ciclo/seg.}, \text{ para el ejemplo: } F = 2\text{Hz}$$

Otra unidad de medición de frecuencia muy utilizada para el análisis de vibración, son los ciclos por minuto (CPM) ó revoluciones por minuto (RPM).

$$1\text{Hz} = 60 \text{ CPM}$$

$$1\text{Hz} = 60 \text{ RPM}; \text{ para el ejemplo } F = 120 \text{ CPM ó RPM.}$$

**AMPLITUD:** La amplitud es el desplazamiento de la onda, a partir de la referencia 0, medida como pico, pico-pico ó rms.

**FASE:** Es la relación angular entre dos puntos de una máquina, que describe el movimiento rotativo entre ellos. También mide el ángulo entre punto superior de la onda senoidal, y una referencia del eje (0).

**ORDEN:** Orden respecto de las revoluciones del eje. Es la cantidad de veces, por revolución del eje, en que ocurren los eventos.

### **9.2.3 Dominio del tiempo**

Cada componente de un tren de máquinas, genera sus señales de vibración específicas. Por ejemplo, consideremos el defecto de una pista de rodamiento. El defecto es impactado por los elementos rodantes (bolas o rodillos), varias veces por cada rotación del eje. Los impactos múltiples en el defecto del rodamiento por revolución del eje, causaran una señal impulsiva en frecuencia, que será significativamente mayor que la velocidad del eje.

Otro tipo de frecuencia (bajas), son generadas por desalineaciones y desbalanceo. Estas señales poseen una frecuencia similar a la de rotación del eje y sus armónicos (2X, 3X), y además tienen mucha mayor amplitud que aquellas causadas por rodamiento o engranajes.

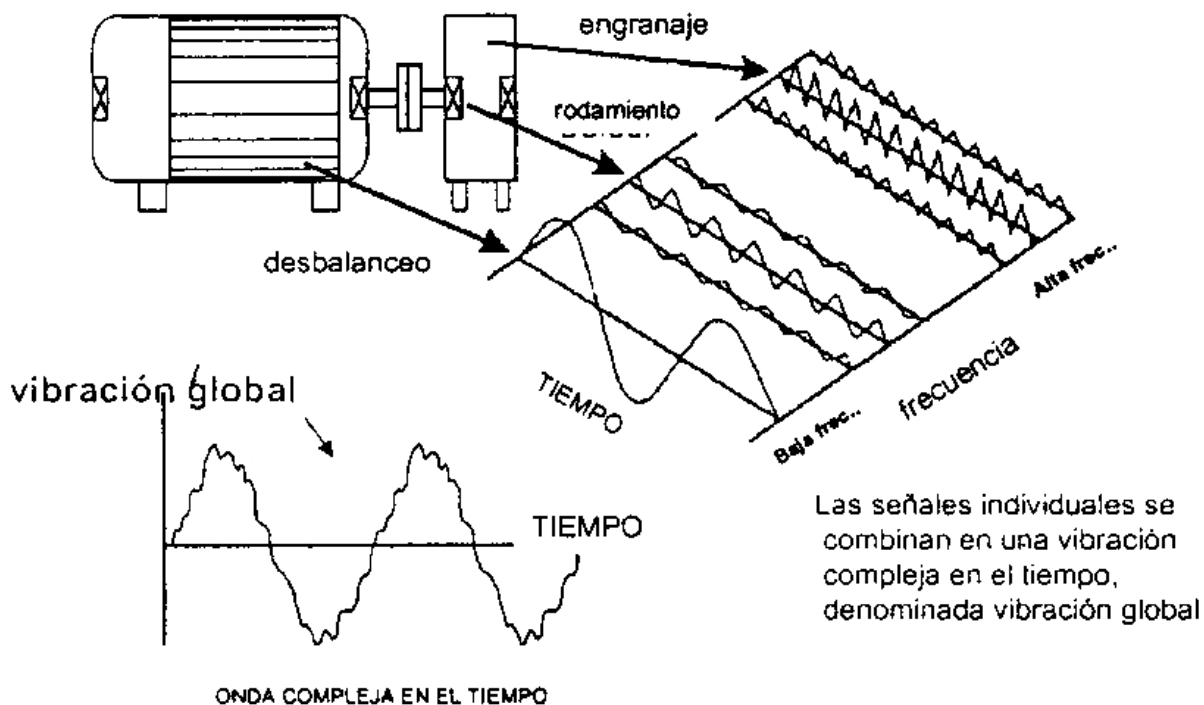


Fig. 9-3: Señales vibratorias en el dominio del tiempo.

Mediante el montaje de sensores en puntos estratégicos de las máquinas, medimos valores globales, consistentes en la combinación de todas las señales generadas por los distintos componentes.

En la Fig. 9-3 un tiempo pequeño correspondiente a dos ciclos, muestra la amplitud de la vibración global, en función del tiempo. En esta representación, la señal de vibración causada por desbalanceo, es la dominante. Tiene una amplitud elevada comparada con las provenientes de rodamientos y engranajes, e incluye a las vibraciones de alta frecuencia. Estas aparecen como pequeñas ondas sobre la onda fundamental de desbalanceo.

Las ondas temporales, son analizadas por comparación con otras ondas previamente colectadas, para detectar cambios en la forma, que determinan los impulsos repetitivos ocasionados por defectos de rodamientos o engranajes.

### **9.2.4 Valor global**

La medición del valor global, es la principal función de los instrumentos manuales y sencillos. El valor global de la amplitud vibratoria, es la energía total medida en un rango específico de frecuencia. Medido numéricamente, un valor mayor que lo normal provee una rápida indicación que algo de la maquina anda mal.

El rango de frecuencia para la cual la medición global se realiza, es determinado por el equipo de monitoreo.

Algunos instrumentos tienen sus frecuencias predefinidas en un rango. En otros, el usuario puede seleccionar el rango de frecuencia deseado.

***“Cuando se comparan valores globales, es importante que ambos sean obtenidos del mismo rango de frecuencias”***

Muchos instrumentos portátiles de banda fija, miden velocidad en la banda de 10 a 1000Hz, debido a que esto es considerado el mejor rango para juzgar los problemas rotacionales y estructurales, tales como desbalanceo, desalineaciones, flojedad y deformaciones aplicadas a componentes, que son las causas más comunes de excesivas vibraciones.

Instrumentos mas avanzados, monitorean en distintas bandas de frecuencias y proveen múltiples parámetros de mediciones globales, por ejemplos las velocidades son medidas entre 10Hz y 1KHz y la aceleración entre 10KHz a 30KHz. Estas mediciones permiten enfocar el problema entre bajas frecuencias rotacionales y/o estructurales, o de altas frecuencias provenientes de rodamientos o engranajes.

En resumen, el monitoreo de vibraciones globales es una buena herramienta para la detecciones de señales vibratorias en el rango de frecuencia prefijado. Sin embargo, algunas maquinas, como por ejemplo los cojinetes de las maquinas papeleras, que son equipos de bajas frecuencias fuertemente cargados, requieren información adicional para un monitoreo adecuado.

Se debe recordar que la detección no es análisis. Si la medición del valor global aumenta, debe realizarse un monitoreo y análisis mas extenso, a fin de diagnosticar la causa del incremento de la vibración, y determinar así la mejor oportunidad para tomar acciones correctivas.

### 9.2.5 Amplitud y frecuencia

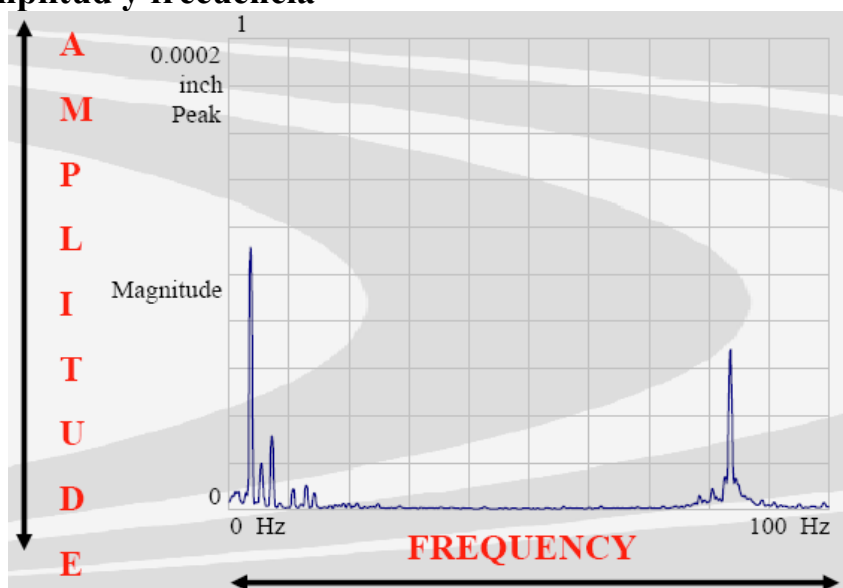


Fig. 9-4: Amplitud-frecuencia.

Cuando se analizan las vibraciones, hay dos componentes de la señal que deben ser observados en primera instancia, su amplitud y su frecuencia.

**La amplitud** es la magnitud de la señal vibratoria e indica la severidad de la falla. Cuando aumenta esta, mayor es el problema.

La amplitud depende del tipo de máquina y debe referenciarse siempre con un nivel “bueno”, correspondiente a la maquina nueva.

**La frecuencia** es el número de veces que se repite el ciclo en un periodo de tiempo determinado. La frecuencia de la vibración indica la procedencia de la falla. Como se observa en la Fig. 9-4, ciertos tipos de fallas ocurren típicamente a determinadas frecuencias.

Conociendo la frecuencia, tendremos un cuadro mas claro sobre la fuente de la vibración.

Los instrumentos y software de mantenimiento predictivo permiten apreciar las frecuencias de las vibraciones, como así mismo los cambios en amplitudes a frecuencias específicas, permitiendo detectar y aislar las fallas de las máquinas.

Es importante diferenciar causa y efecto; por ejemplo, si se detecta una vibración correspondiente a una avería en la pista externa del rodamiento, el defecto en el mismo



probablemente exista. Sin embargo muchas veces el rodamiento no es la fuente del problema. Usualmente otro problema de la máquina es la causa del daño. Cuando cambiamos un rodamiento se debe controlar automáticamente si hay otros defectos, tales como desbalanceo o desalineación, y reprogramar su corrección junto con el cambio del rodamiento.

### 9.2.6 Amplitud de vibración (parámetros medibles)

Hay dos mediciones derivadas del desplazamiento de la vibración.

- Velocidad
- Aceleración

**La velocidad** es la derivada del desplazamiento en función del tiempo. Esto es, la variación del cambio del desplazamiento. La velocidad es un buen indicador para evaluar las vibraciones de baja frecuencia (por ejemplo desbalanceo, desalineamiento, flojedad mecánica y defectos de rodamientos de baja frecuencia, que evidencian avances en el deterioro del rodamiento).

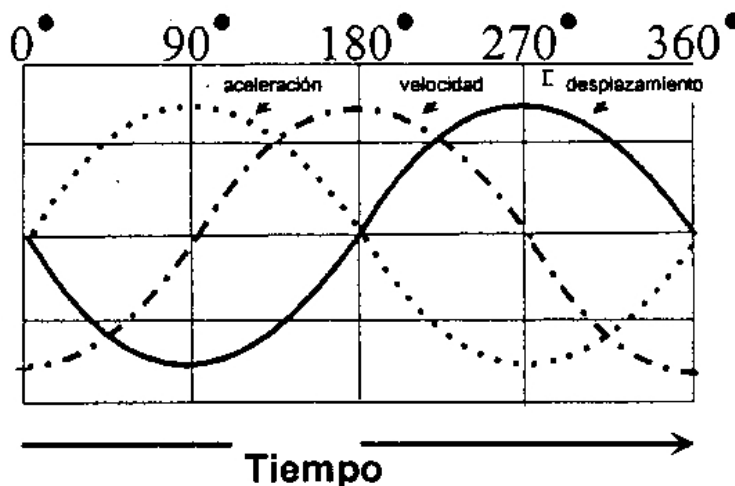


Fig. 9-5: Relación de parámetros desplazamiento, velocidad y aceleración.

**La aceleración** es la segunda derivada del desplazamiento respecto del tiempo, y es la variación del cambio de la velocidad. La aceleración es una herramienta muy valorable en el análisis de maquinarias rotativas, dado que la medición da como resultado una respuesta lineal sobre una banda ancha de frecuencia, y se visualiza más, a medida que la frecuencia se incrementa.

Se tienen entonces tres características medibles de la vibración: desplazamiento, velocidad y aceleración. En la Fig. 9-5 se puede observar que cuando la masa se desplaza por el punto cero, la velocidad es máxima. Así mismo cuando el desplazamiento es máximo, la velocidad es cero. Esto mismo ocurre para cualquier frecuencia.

La aceleración tiene otra relación: cuando el desplazamiento esta en el punto máximo positivo, la aceleración lo esta en máximo negativo. Cuando el desplazamiento pasa por cero, la aceleración también posee este valor.

Los circuitos electrónicos integradores o derivadores de los instrumentos colectores de datos, logran obtener a partir de la señal del sensor las dos características restantes, es decir si se tiene un sensor acelerómetro que detecta aceleración de la vibración, internamente puede obtener la velocidad integrando una vez o el desplazamiento integrando dos veces, según lo requerido.

### 9.2.7 Factores de escala de la amplitud

Cuando se comparan valores de amplitud de vibraciones, Se debe tener en cuenta los factores de escala. Estos son: mediciones Pico, Pico-Pico o RMS, ver Fig. 9-6

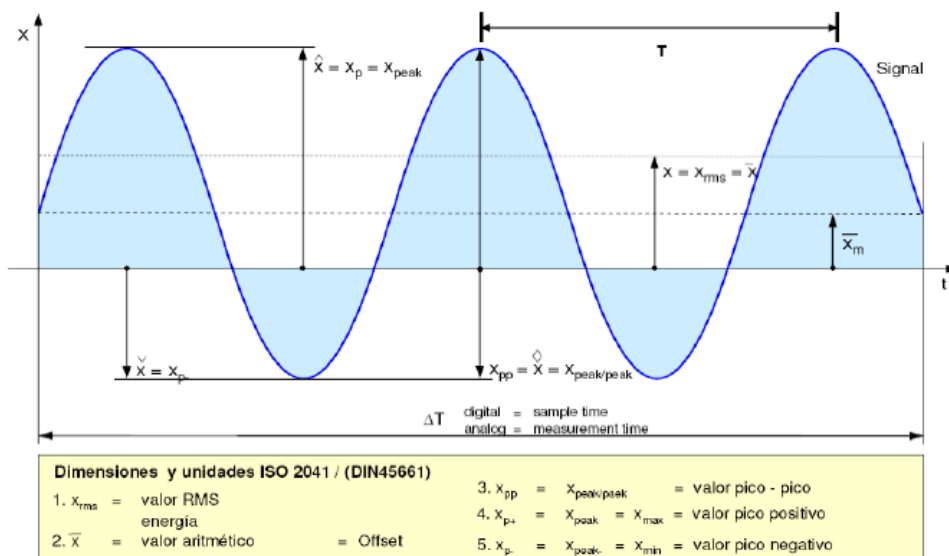


Fig. 9-6: Amplitud de la vibración.

**Pico:** Representa la amplitud desde el valor cero de referencia al tope del valor máximo. La amplitud pico es usada para medir aceleración, habitualmente calculada a partir del valor RMS.

**Pico-Pico:** Es la amplitud medida desde el tope positivo al tope negativo. El valor P-P resulta igual a 2 veces el valor Pico.

**RMS:** En términos generales, el valor RMS (root mean square) es derivado a través de una conversión matemática que relaciona la energía de la c.c con la de la c.a. Es generalmente usado para medir la energía efectiva de la vibración conformada por múltiples señales de distintas frecuencias. Si se mide una onda senoidal pura, el valor RMS es 0.707 del valor Pico.

La norma ISO 10816 utiliza la velocidad RMS para establecer los rangos de severidad de las máquinas.

No es importante saber que procedimiento emplea el instrumento de medición para calcular el valor de la amplitud. Pero si se debe tener en cuenta, cuando se tenga que referirse a valores globales, al rango de la frecuencia de la medición y cual es el factor de escala seleccionado.

### **9.2.8 Unidades de medición**

#### **Desplazamiento:**

El desplazamiento representa la distancia, y es utilizada preferentemente en máquinas de bajas revoluciones.

El desplazamiento Pico-Pico es igual a la distancia total recorrida por el componente vibratorio. Debe ser medido con sensores de corrientes parásitas (eddy current probe).

El desplazamiento se mide en:

*mils* ( $1mil = 0.001''$ )

*micrones* ( $0.0001\text{ cm}$ )

#### **Velocidad:**

La velocidad de la vibración es la unidad más utilizada para propósitos generales de evaluación de máquinas de baja y media velocidad. El rango habitual en frecuencias es de 10Hz a 1000Hz.

La velocidad es medida en:

$$\frac{in}{seg} \quad \text{ó} \quad \frac{mm}{seg}$$

**Aceleración:**

La aceleración es la relación de cambio de velocidad. Típicamente se mide amplitud Pico o RMS, siendo la mas utilizada para evaluar altas frecuencias como las generadas por rodamientos y engranajes.

Medida en:

Gs (1G= aceleración producida por la gravedad)

$$\frac{In}{seg^2}$$

$$\frac{mm}{seg^2}$$

**9.2.9 Sensores de medición**

**9.2.9.1 Acelerómetros**

Los acelerómetros generalmente tienen un ancho rango de respuesta en frecuencia, y el más alto. Sin embargo, su limite esta dado por las señales a bajas frecuencias. La sensibilidad esta en el orden de decenas o centenas de milivolts/G, Pico (1G = 386,1 In/seg<sup>2</sup> = 9,8m/seg<sup>2</sup>).

La construcción consiste en un cristal piezoeléctrico con un sistema masa resorte de precarga (Fig. 9-7) y en algunos casos, circuitos electrónicos internos para preamplificación (IPC).

El voltaje es generado por los cambios en la fuerza ejercida sobre el cristal piezoeléctrico y es proporcional a la aceleración (fuerza=masa X aceleración). Esto es un movimiento interno insignificante.

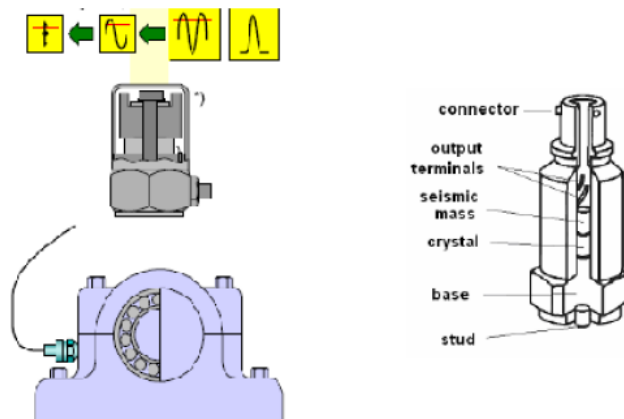


Fig. 9-7: Acelerómetro.

Estos acelerómetros son virtualmente inmunes al desgaste. Sin embargo, los choques excesivos (por ejemplo caídas, golpes sobre superficies duras, etc.) pueden autogenerar altos voltajes suficientes para destruir sus componentes electrónicos internos, si es que los tiene, o fracturar el cristal piezoeléctrico.

Sus características son:

- El tamaño favorece su colocación, ya que son pequeños y livianos.
- No tienen partes móviles, lo cual brinda mayor confiabilidad.
- Los acelerómetros tienen una clara respuesta lineal en un amplio rango de frecuencia.
- Son razonablemente económicos.
- Los acelerómetros proveen una señal de salida elevada para los relativamente bajos niveles de energía de alta frecuencia, haciéndolos especialmente atractivos para monitorear rodamientos. Normalmente las medias y altas frecuencias son medidas con acelerómetros.

### **9.2.9.2 Sensor de velocidad**

Los sensores de velocidad se los monta en la carcasa de las máquinas o cojinetes. Algunos sensores modernos son de estado sólido, con integración electrónica interna y salida en velocidad.

Estos sensores son efectivos en frecuencias bajas e intermedias (en el rango de 10 a 1500Hz).

La velocidad es considerada el parámetro más conveniente para evaluar el estado de las máquinas. Su principio de funcionamiento es a través de la inducción magnética.

Al igual que los acelerómetros, los sensores de velocidad deben estar bien montados (ver Fig. 9-8), con un correcto contacto con la superficie a censar.

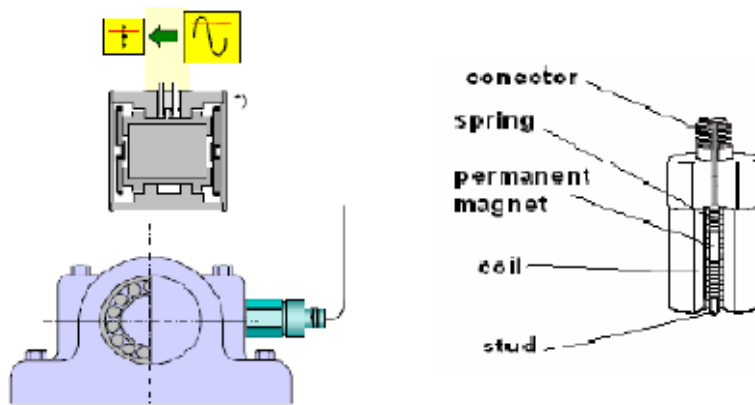


Fig. 9-8: Censor de velocidad.

Características:

- Usualmente para medir la vibración del cuerpo de la maquina o soporte.
- Efectivos en el rango de baja a media frecuencia (10 Hz a Aprox. 15,500)Hz)
- Generan su propia señal.

### **9.2.9.3 Sensor de desplazamiento**

El desplazamiento es típicamente medido con el sensor comúnmente conocido como “de desplazamiento” o de corrientes parásitas (eddy current) (Fig. 9-9). Este sensor no tiene contacto con el eje, y mide la distancia a la superficie de medición.

Los sensores de desplazamiento son utilizados en los equipos con cojinetes de deslizamiento, con una película de aceite.

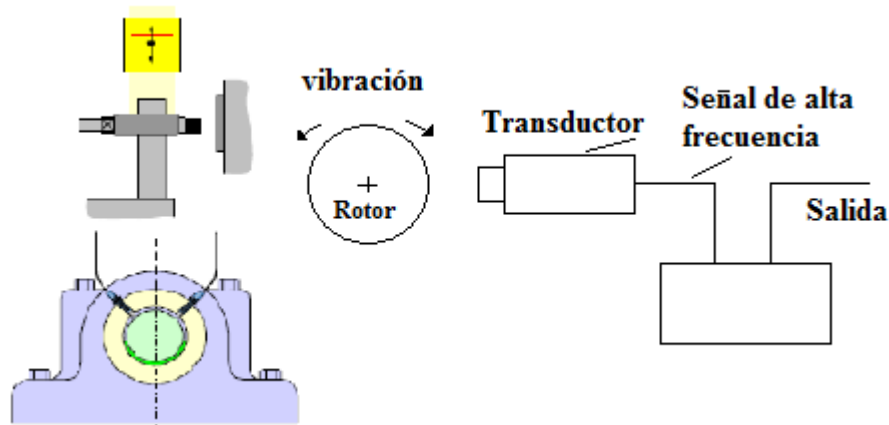
Su tamaño es generalmente pequeño, con un bobinado de alambre muy fino, protegido con un recubrimiento delgado y no conductor. Energizado con una corriente de alta frecuencia, se crea un campo electromagnético alrededor de un embobinado, el cambio de posición de metales conductores dentro de este campo magnético, es detectado con gran precisión.

Requieren de un oscilador-demulador y una fuente de alimentación (driver), como así mismo un cableado de buena calidad entre el sensor y el driver.

La distancia entre el sensor y la superficie de medición (gap) es usualmente limitada de 0.1 a 0.2 pulgadas o menos.

Los sensores de desplazamiento tienen un rango de frecuencia mas bajo de los tres tipos mocionados, y también son utilizados para medir las rpm del eje (tacómetros), censando una marca, agujero o resalto.

Los sensores de desplazamiento miden únicamente el movimiento relativo del eje respecto de la carcasa del cojinete. Si la máquina y el rotor se mueven juntos, la medición del desplazamiento es cero, cuando en realidad la máquina esta vibrando.



**Fig. 9-9: Censor de desplazamiento.**

Características:

- Mide distancias relativas entre dos superficies.
- Respuesta precisa en bajas frecuencias.
- Mide directamente en unidad de desplazamiento.

Desventajas:

- Difícil de instalar o reemplazar.
- Requiere fuente de alimentación externa.

### **9.2.10 Monitoreo de múltiples parámetros**

La velocidad es considerada el parámetro de propósitos generales para evaluar el estado de las máquinas. Esto es debido a que la mayor cantidad de problemas ocurren en bajas frecuencias, (por ejemplo desbalanceos, desalineaciones, flojedades, etc.), y la medición de velocidad, resalta los eventos que ocurren en ese rango. Por este motivo Las normas ISO proveen recomendaciones generales sobre severidad de las vibraciones usando velocidad. Sin embargo, la llave para detectar fallas específicas es realizar las mediciones en la manera apropiada y adecuada a la falla que se espera encontrar.

Para detectar mejor y aislar la falla de máquinas, el analista realiza múltiples mediciones. Típicamente se mide velocidad y cuando es apropiado se mide también aceleración, envolvente de aceleración y SEE. La envolvente de aceleración y SEE son técnicas de procesamiento de señales que han tenido buen suceso para la detección temprana de problemas de lubricación y eventos de alta frecuencia (rodamientos, engranajes).

Los colectores de datos modernos y portátiles, brindan al usuario la posibilidad de configurar hasta 12 mediciones para colección automática en un punto. Usando el mismo sensor dual, el usuario necesita presionar solo un botón, para coleccionar secuencialmente 12 mediciones preconfiguradas. Por ejemplo el analista puede montar el sensor horizontal sobre la carcasa del cojinete, presionar el botón y medir.

***Velocidad*** (para eventos de baja frecuencia)

***Aceleración*** (para medias y altas frecuencias)

***Envolvente de aceleración*** (en bandas múltiples para determinar rodamientos y engranajes)

***SEE*** (para detectar lubricación y estado de rodamientos)

Con límites de alarmas adecuados para cada medición, se logra una alta eficiencia, cuando se monitorean múltiples problemas de maquinas y ayuda al analista a aislar el problema de la maquina, con poco tiempo o esfuerzo, de su parte.



### **9.2.11 Aplicación de sensores**

El parámetro primario para seleccionar el sensor es la velocidad de la máquina. La rpm, del eje determina la frecuencia fundamental de interés. Generalmente es deseable que el transductor provea de información sobre el rango de 0.4 – 1.0 veces la frecuencia de rotación.

Tipos de máquina y elementos. También es de gran importancia en la selección del sensor, el tipo de máquina y los elementos asociados. Máquinas con alabes (bombas, ventiladores, compresores, turbinas, etc.) pueden generar vibraciones de interés a frecuencias iguales a el numero de alabes por las r.p.m. del eje. Los acelerómetros son requeridos para estos casos. La amplitud y la aptitud de la medición, esta influenciada por la relación de masa entre los alabes, rotor/eje y carcasa. Por ello, ventiladores y bombas con los alabes con mayor masa respecto del eje/rotor pueden generar mucha información útil. Pero los alabes de turbinas y compresores con relativamente menor masa respecto de las grandes masa ejes/rotores, emiten señales que pueden ser insignificantes y pueden ser muy difíciles de medir (sin embargo, estas señales son muy útiles para el análisis mas que para el monitoreo).

Los cojinetes de deslizamiento son excelentes fuentes de señales vibratorias, ya que hay menos elementos mecánicos entre el eje y el sensor (aceite, metal blanco, carcasa, etc...). Los sensores de desplazamiento son usualmente preferidos con estos tipos de cojinetes.

Los cojinetes antifricción (rodamientos) generan vibraciones en la frecuencia de rotación y otras mucho mas elevadas, asociadas con el numero de bolillas y diámetros de las pistas interior/exterior. Normalmente se utilizan acelerómetros para su monitoreo.

El tipo de falla posible de la máquina, es un factor importante para seleccionar el tipo de sensor. Los sensores son como ventanas. A través de las cuales, porciones de las señales vibratorias pueden ser observadas. Los sensores de desplazamiento tienen un rango máximo de 0 a 1000Hz, los de velocidad desde 10 a 1500Hz y los acelerómetros desde 0 a aproximadamente 40KHz.

### **9.2.12 Resonancia**

Un diapasón permite describir la resonancia. Cuando se golpea, el produce un tono. La frecuencia del tono depende de las dimensiones físicas del diapasón, siendo esta la frecuencia natural del diapasón. Como el diapasón, cada componente de una máquina o parte de su estructura, tiene su frecuencia natural determinada por las dimensiones físicas y propiedades de la máquina (rigidez, masa). Muchos problemas de vibraciones de las máquinas, ocurren cerca de su frecuencia natural, que es puesta en resonancia por la excitadora (r.p.m.) y como resultado, puede aumentar su amplitud original hasta 20 veces.

Se denomina *velocidad crítica* a la velocidad rotacional de la máquina que coincide con la frecuencia natural. Cuando esto ocurre, la magnitud de la amplitud de la vibración es amplificada.

Los constructores y diseñadores de máquina entienden la importancia de la resonancia y las diseñan para rotar las frecuencias menores o mayores que la frecuencia natural para escapar de la misma (ver Fig. 9-10). La masa y la rigidez de los elementos mayores de la instalación, deben ser consideradas. Fundación, base, cañerías, eje, rotor, carcasa de cojinete, etc., todo contribuye a la transmisión en cadena de la señal vibratoria. En adición a la resonancia y velocidad crítica, esas partes de máquinas pueden alterar (amplificar o amortiguar) las vibraciones.

En general, los elementos flexibles y livianos pueden generar señales significativas y alterar las vibraciones de otros componentes. Elementos pesados y rígidos pueden actuar como buenos conductores o transmisores de las señales vibratorias. En proximidades de la resonancia, si el balanceo o la alineación no están en tolerancias, la vibración de la máquina será excesiva, o un pequeño aumento en la velocidad de la máquina resultara en un incremento de la vibración, cuando se sospecha de una resonancia, se utiliza el ensayo de golpe, ó se puede plotear punto por punto para determinar el modo natural. Se debe observar que la frecuencia natural no cambia cuando cambia la velocidad de la máquina, lo cual ayuda en su identificación. Para salir de una resonancia, puede modificarse la

frecuencia natural ( $F_n$ ) variando la masa o la rigidez. Aumentando la masa o bajando la rigidez, se baja la  $F_n$ .

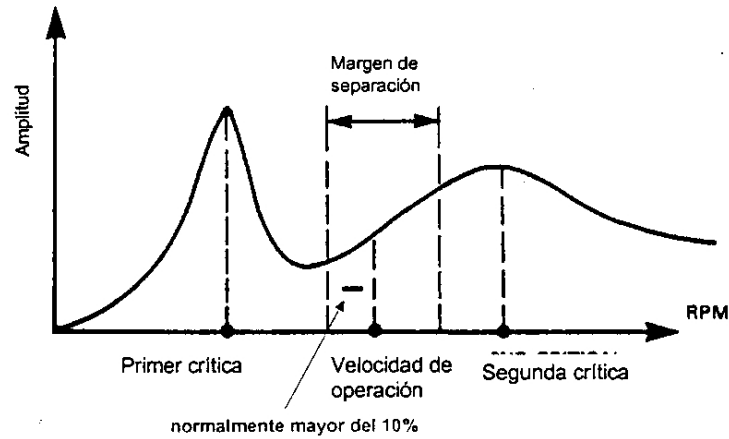


Fig. 9-10: Velocidades críticas.

### 9.2.13 Detección y análisis

Existe una gran diferencia entre detectar un problema y analizar la causa del problema de la máquina. Cambiando un cojinete que muestra desgaste por una vibración excesiva, se podrá o no resolver el problema de vibración. Normalmente otro problema es la causa del desgaste prematura del cojinete, Para resolver el problema, se debe resolver la causa raíz (por ejemplo, lubricación inadecuada, desalineación, flojedad, desbalance). Si no se hace, el nuevo cojinete también tendrá desgaste prematuro.

Si se corrige el síntoma y la causa, la vida y eficiencia de la máquina se optimiza, por lo cual se maximiza la producción.

#### **Detección:**

Para que un mantenimiento predictivo tenga éxito, el requerimiento mínimo es la detección precisa de las fallas. Usando el sistema de monitoreo periódico, la configuración de las alarmas de cada punto de medición y el seguimiento de las tendencias, se tiene la posibilidad de detectar problemas en etapas iniciales. Detectando tempranamente, se evitan fallas catastróficas con daños secundarios, se dispone de tiempo para programar las reparaciones, se obtiene un trabajo más eficiente con un mejoramiento de los costos.

**Análisis:**

Una vez detectada una falla, el análisis de las mediciones excepcionales brindara información sobre el problema mismo y la raíz de la falla. Usando herramientas de análisis y experiencia, se puede ser capaz de identificar los problemas específicos de las máquinas por su característica vibratoria (dirección de la vibración, espectro, relación de fase, etc.).

## **9.3 Las mediciones**

### **9.3.1 Configuración de las mediciones**

Es imperativo que los datos colectados sean compresibles y repetitivos. La confianza en la precisión de los datos, permitirá al analista detectar cambios en el funcionamiento de las máquinas, el diagnóstico de síntomas de fallas mecánicas y sus causas raíz. La repetitividad de los datos puede ser correcta, solo si el proceso de medición captura la verdadera vibración en las condiciones de operación correcta.

Las mediciones deben tomarse en el mismo lugar para comparación (moviendo unos centímetros el sensor, suele haber diferencias significativas). Cuando se mide con sensores magnéticos o portátiles, se deben marcar los puntos con tintas permanentes, o taladrando un pequeño cono, o montando discos de medición permanentes.

El ángulo del sensor siempre será un ángulo recto con respecto a la superficie de la medición.

Se deben realizar las mediciones en operación normal, es decir cuando las temperaturas de los cojinetes alcancen los valores normales y estables, como asimismo los valores de corriente, caudal, presión y carga.

En máquinas con variación de velocidad o carga de deben proveer distintas mediciones, una para cada condición.

**Consideraciones físicas:**

- ☞ Selección de las máquinas.
- ☞ Selección de los planos de medición.
- ☞ Selección de la posición del sensor.
- ☞ Preparación de la superficie.
- ☞ Técnicas de montaje del sensor.

La identificación de los puntos de medición debe ser clara. La descripción del punto ayuda a comprender la denominación de la identificación del punto.

Por ejemplo:

BOMBA1 - 1VV: Lado opuesto del acople, vertical, velocidad.

BOMBA1 - 1HA: Lado opuesto, horizontal, aceleración.

BOMBA1 - 2AA: Lado acople, axial, aceleración.

### **9.3.2 Selección de las máquinas**

Existe cierta clasificación de las máquinas según las consecuencias en cuanto a la producción que una falla de estas genere.

**CRITICAS:** Si la falla o parada ocurre, se para la producción o crea serio riesgo para la seguridad.

**EQUIPOS ESENCIALES:** Si la falla o parada ocurre, la producción disminuye es detenida.

**EQUIPOS NO ESENCIALES:** Si la falla o parada ocurre, puede haber pérdida de producción, sin embargo una unidad de repuesto operar simultáneamente, o la reparación no afecta demasiado a la producción.

El monitoreo de los equipos debe comenzar por orden de prioridades. Las primeras máquinas a incluir en el programa, pueden ser aquellas con problemas conocidos o problemas históricos. Otros factores a ser considerados para clasificar a las maquinas son:

#### **Seguridad del personal**

Si el equipo trabaja con material peligroso, se debe monitorear su condición con mayor frecuencia.

#### **Probabilidad de falla**

Los equipos operando a su límite de diseño y/o con materiales peligrosos, deben tener una frecuencia mayor de monitoreo.

#### **Nivel de servicio al equipo**

Es un equipo atendido por personal permanente, o es operado remotamente. Los equipos no atendidos normalmente, requieren monitoreo continuo.

### **Costo y efecto de una parada imprevista**

Si el costo o el efecto son elevados, el monitoreo es justificado.

### **9.3.3 Configuración de la base de datos**

Antes de configurar los puntos de medición, se deben realizar las siguientes etapas para asegurar una estructura correcta de la base de datos.

#### ***Posicionamiento:***

Se debe recorrer el área de la planta donde se encuentran los equipos a ser monitoreados, determinando su ubicación, los puntos de medición y secuencia de las mismas (rutas), particularidades y opciones de rutas, aspectos de seguridad, accesibilidad, identificaciones.

#### ***Desarrollo de las planillas de datos:***

Establecer que máquinas van a ser monitoreadas y completar una planilla de datos para cada una de ellas.

La planilla de datos provee información necesaria sobre cada elemento rotante, a fin de identificar las frecuencias características, los puntos de medición, datos de reparaciones, etc.

### **9.3.4 Planos de medición**

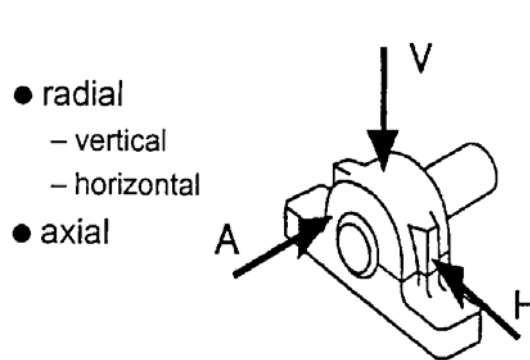


Fig. 9-11: Planos de medición.

Es recomendable montar el sensor de vibración orientados en los sentidos horizontal, vertical y axial.

El montaje radial es el más común. Hay que evitar las posiciones con variaciones de temperaturas o excesiva condensación, y en el caso de acelerómetros, el flujo de aire/fluidos sobre el sensor.

Dado que se conoce como los problemas crean vibraciones en cada plano, la lectura en tres sentidos (Fig. 9-11) puede ayudar a interpretar el origen de las mismas.

En máquinas horizontales

**Horizontal:** El desbalanceo es la causa más común de vibraciones en el plano radial (horizontal y vertical). Normalmente las máquinas son más elásticas en el plano horizontal.

**Vertical:** Normalmente es menor que en el plano horizontal, debido a la diferencia de rigidez mencionada, y a la acción de la gravedad.

**Axial:** En condiciones ideales presentan valores más bajos que los radiales, dado que las fuerzas generalmente son perpendiculares al eje. Sin embargo, los problemas de desalineaciones crean vibraciones en este sentido.

### **9.3.5 Posición del sensor**

El monitoreo portátil de vibraciones requiere adquirir los datos cada vez, en el mismo lugar físico de la máquina. Por ello, es escrita la dirección exacta de los puntos.

Conceptualmente (para propósito de análisis), en máquinas horizontales, las mediciones deben ser tomadas en los planos horizontales y vertical, para cada cojinete, y como mínimo una axial en cada eje.

Para propósito de detección, muchas veces se toma solo en horizontal. Cuando el problema es detectado, también se debe tomar en vertical.

En las bombas y máquinas verticales se tiene el plano de medición horizontal, con dos mediciones radiales a 90° cada una.

Siempre se debe mantener a distancia el sensor de la conexión eléctrica del motor, para prevenir excitación en 50 y 100 Hz.

### Identificación

Las configuraciones de las máquinas son diferentes (tipos, tamaño, función y componentes). Los datos son tomados de cada cojinete, y cada punto de medición es identificado numéricamente en secuencia, con el sentido de la trasmisión de potencia, desde el conductor al conducido. Un ejemplo de identificación de un punto es el que se muestra en la Fig. 9-12:

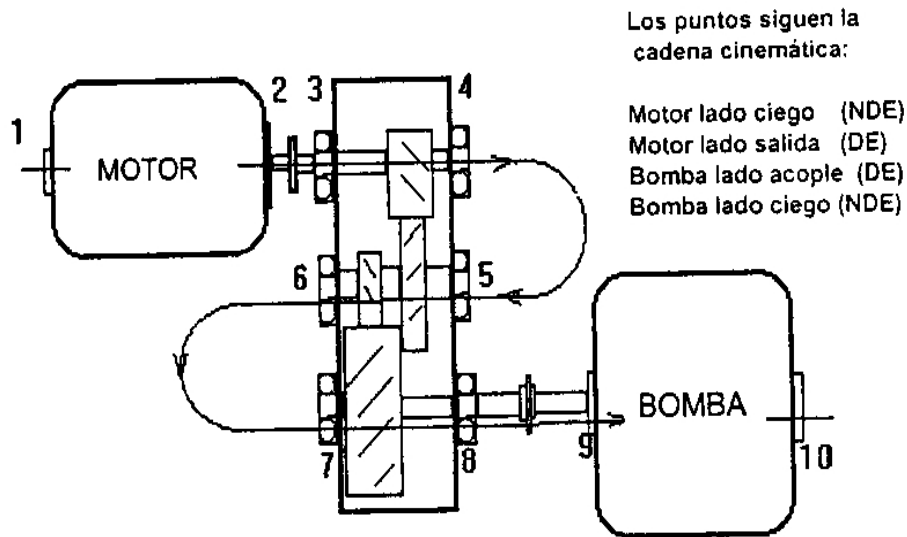


Fig. 9-12: Secuencia de puntos de medición según cadena de transmisión del sistema.

Se debe enumerar cada cojinete en secuencia a partir del lado ciego del conductor (motor) (NDE), siguiendo la trasmisión de potencia, hasta el cojinete ciego del último conducido (NDE). La identificación de la secuencia del flujo de potencia es importante para el diagnóstico del análisis de espectros.

En cada cojinete, el plano de medición se identifica por H por horizontal, V por vertical y A por axial. En bombas verticales, las mediciones radiales pueden denominarse F (frontal a la descarga) y T (transversal a la descarga).



### 9.3.6 Fijación del cable

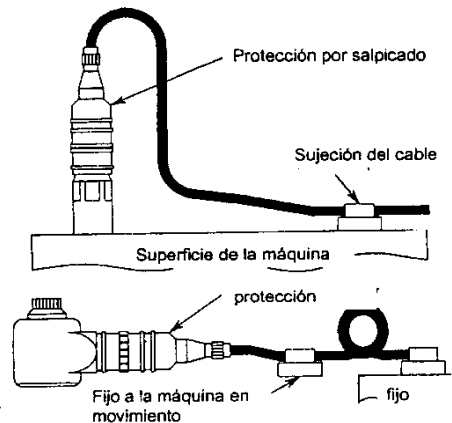


Fig. 9-13: Fijación del cable para un acelerómetro permanente.

Cuando los acelerómetros se montan en forma permanente, el cable eléctrico del sensor no debe estar excesivamente tirante, ni con demasiada flojedad que permita el movimiento (Fig. 9-13). En ambos casos, las variaciones en las fuerzas mecánicas, puede alterar la resistencia de contacto y la capacitancia de los acoples, lo cual puede dar como resultado una lectura inestable e imprecisa.

Es recomendable que el cable este firmemente engrapado sobre la superficie de montaje (cinta, grampa, epoxi, etc.), a aproximadamente 150 mm del sensor. El cable entre el transductor y la fijación, no debe ni estar ni flojo ni tenso. Se debe sellar la conexión o puntos de unión con silicona o equivalente para evitar el ingreso de humedad.

### 9.3.7 Métodos de montaje

El metodo recomendado para montar el sensor depende del acceso, conveniencia o consideraciones económicas, así como de aspectos técnicos, en general, el metodo de montaje tiene influencia en la respuesta en frecuencia, (exactitud vs. frecuencia) del sensor. En muchos casos, habrá cambios en la respuesta en alta frecuencias.

Basado en estas consideraciones, en orden de preferencia, se aconsejan los siguientes montajes:

1. Montaje atornillado
2. Montaje con cemento adhesivo

3. Montaje con base magnética
4. Montaje con sensor manual

La mayor sensibilidad del sensor es en el sentido de su montaje.

Las mediciones de aceleración y SEE proveen mejor resultado cuando el sensor es ubicado lo mas próximo posible a la zona de carga.

Las normas ANSI S2.17-1980 Y ASA 24-1980, Sección 6.1.5 recomiendan: “los sensores manuales y vibrómetros no son aceptados para las mediciones por estas normas. Estos pueden ser usados para detectar en las superficies de las máquinas, cual es la ubicación mas conveniente para los sensores.”

### 9.3.7.1 Montaje atornillado

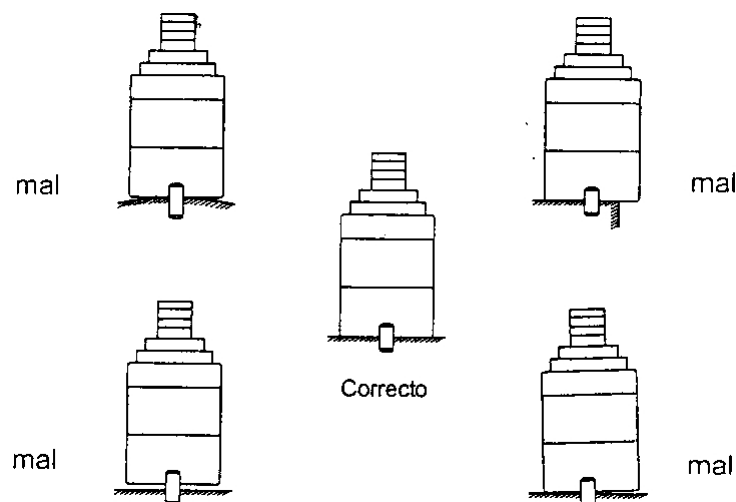


Fig. 9-14: Montaje atornillado.

El montaje por medio de tornillo o arandela roscada (ver Fig. 9-14) directamente a la superficie de la máquina, normalmente provee la mejor respuesta en frecuencia. Los agujeros roscados pueden hacerse en varios lugares, para facilitar las mediciones en forma temporal o periódica.

- ☞ El agujero roscado debe ser perpendicular a la superficie de montaje del sensor, con su eje en la misma orientación lógica (por ejemplo, sobre la tapa del cojinete, el eje del agujero/sensor apuntando a la línea central del eje-cojinete)
- ☞ La superficie de montaje sobre la máquina, debe estar plana y pulida (una terminación superficial maquinada es la adecuada).
- ☞ Respetar el torque recomendado por el fabricante del sensor.
- ☞ Materias extrañas (pintura, adhesivos, juntas, etc.) entre el sensor y la zona de medición, pueden reducir dramáticamente la respuesta en la alta frecuencia. Una capa fina de grasa silicona, sin embargo, puede incrementar la rigidez del montaje y por lo tanto mejorar las respuestas en alta frecuencia.
- ☞ Si se requiere de un aislamiento eléctrico entre el sensor y la máquina, este debe ser fino y rígido (se recomienda mica). Otros materiales pueden reducir la respuesta en frecuencia, llegando a un máximo de 1kHz, o menos, par un acelerómetro.

### **9.3.7.2 Montaje con cemento adhesivo**

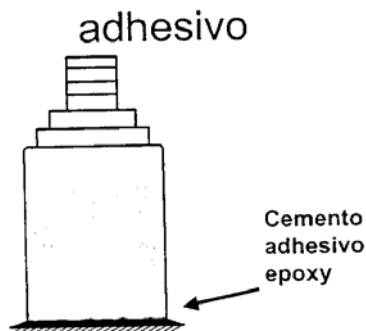


Fig. 9-15: Montaje con cemento adhesivo.

Las mismas consideraciones que para la arandela roscada, se realiza para el material adhesivo.

- ☞ El material adhesivo entre el transductor y la superficie de montaje (ver Fig. 9-15), debe ser lo más fino y rígido posible.

- ☞ Adicionalmente, la fuerza de sujeción deberá ser de naturaleza semipermanente, para permitir una futura remoción del sensor sin producir daños en el mismo.
- ☞ Por esta razón, los dos tipos de cementos adhesivos más utilizados para montar sensores de vibraciones, son los cementos dentales y los cianoacrilatos.
- ☞ El cemento dental debe ser mezclado, y permite el trabajo de limado o rasquetado con facilidad.
- ☞ Los cianoacrilatos no requieren mezcla, se aplican con una fina capa, pero son difíciles de remover.
- ☞ El uso de cinta adhesiva en ambos lados tiene resultados cuestionables.
- ☞ Siempre evite adhesivos del tipo elastómeros.

En todos los casos, la repuesta en alta frecuencias será levemente modificada, a pesar de que se utilice un adhesivo recomendado.

### **9.3.7.3 Montaje con base magnética**

Un medio conveniente para proveer un montaje rápido o temporal, es el uso de una base magnética con un espárrago para unir el sensor (ver Fig. 9-16).

Nuevamente, la superficie de montaje de la máquina, debe estar limpia y plana (y por supuesto magnética). Este metodo reducirá la repuesta en cada frecuencia en algunos kilohertz (por ejemplo, de 1kHz a 5kHz). Esta limitación varía considerablemente con el sensor, base magnética, y características de la superficie de montaje.

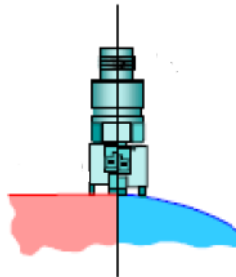


Fig. 9-16: Montaje con base magnética.

Adicionalmente, si el imán no es montado con un contacto íntimo con la superficie, la base del sensor puede saltar bajo vibraciones, introduciendo una señal falsa.

Como conclusión, la base magnética puede introducir algunos errores definidos en la respuesta en frecuencias sobre varios kilohertz (posiblemente en varios cientos de hertz con sensores de velocidad).

La regla general indica que la respuesta en frecuencias, se reduce aproximadamente un 50% respecto de la roscada.

Es importante resaltar, que el operador debe conocer cual debe ser la frecuencia de interés. Cada caso debe ser analizado en forma individual.

#### **9.3.7.4 Montaje con sensor manual**

Son muy comunes los sensores manuales con una punta de extensión como el de la Fig 9-17. Este método es rápido y conveniente por la practicidad, sin embargo, está expuesto a varias fuentes de errores que deben ser reconocidos.

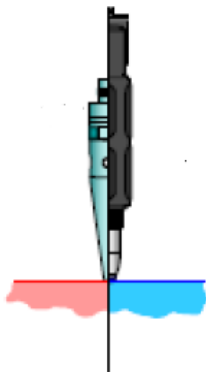


Fig. 9-17: Montaje Manual (punta).

Primero, el método de contacto introduce una repuesta en alta frecuencia errónea. El grado de errores es mucho más pronunciado que el método magnético (normalmente se llegan a frecuencias de 1kHz, o menores).

Segundo, la orientación del eje del sensor es muy importante. Moviendo el sensor respecto de la perpendicular a la superficie, se introduce un error significativo.

Tercero, la magnitud de la fuerza que se ejerce con la mano, en especial cuando se utilizan acelerómetros, introduce errores en la lectura.

Cuarto, las mediciones deben ser tomadas precisamente en el mismo lugar, para compararlas entre si. Apartándola solo unos centímetros, las lecturas de vibraciones presentan cambios drásticos.

Por ello, es imperativo que el personal que emplee este método deba estar entrenado y tomar lecturas de datos correctamente. Los errores pueden ser de  $\pm 15\%$ , a lo largo de una recorrida.

- a) Las lecturas deben ser tomadas en el mismo lugar (marcar con tinta, o mejor, taladrar un punto cónico)
- b) El traductor debe ser orientado en forma perpendicular a la superficie.
- c) Siempre, debe emplearse una presión manual similar.
- d) Mediciones realizadas por distinto personal puede ser diferentes.

Los sensores manuales son útiles para determinar las mejores ubicaciones de los puntos a medir, (con sensores mas confiables y para aproximar los niveles de alarma)

### 9.3.7.5 Disco para montaje magnético de sensores

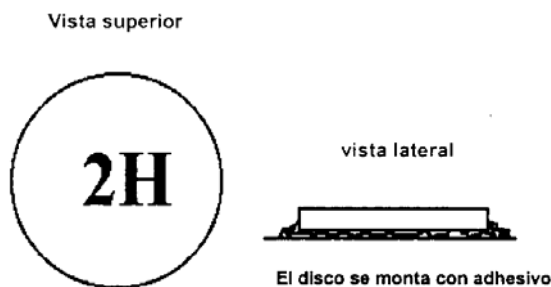


Fig. 9-18: Montaje Magnético de sensores.

Los acelerómetros manuales requieren un área de montaje sobre la máquina. Los discos de acero proveen una superficie plana y limpia para acoplar los sensores magnéticos (Fig. 9-18). Estos discos aseguran que cada medición periódica es obtenida en la misma posición de la máquina.

Las máquina que son periódicamente controladas, pueden tener un disco de acero laminado en frío de 1 1/8 in (28.6 mm) de diámetro en todos los puntos de medición, fijo con adhesivos apropiados (el diámetro dependo del tamaño de imán utilizado). El lado del disco que ira fijarse a la máquina posee una superficie rugosa, de aproximadamente 500 rms, para asegurar la adhesión. El disco debe tener un espesor suficiente como para no sufrir deformaciones, (espesor mínimo de 1/8 in o 3,2 mm, siendo lo más usual de 3/8 in o sea 9.5 mm).

Son recomendables discos de acero AISI 409, los cuales tienen un alto contenido de hierro como para asegurar las buenas características magnéticas, al mismo tiempo que posee una buena resistencia a la corrosión de ambientes hostiles.

Los aceros 409 se tratan con una capa de pasivador para ambientes húmedos, lo cual es aceptable. Se puede marcar la identificación del punto sobre la superficie del disco (ejemplo “2H”), para asistir a la persona que toma las mediciones.

**Instalaciones de discos de montaje de acelerómetros:**

- 1- Asegurar que la posición de medición sobre la maquina, este libre de pintura, aceite, suciedad, etc. Limpiar hasta el metal usando una amoladora manual de 4 in o una pulidora neumática.
- 2- Haciendo uso de un adhesivo apropiado, se debe cubrir la cara del disco y montar sobre la máquina, debe lograrse un completo llenado alrededor del disco (ver Fig. 9-19).

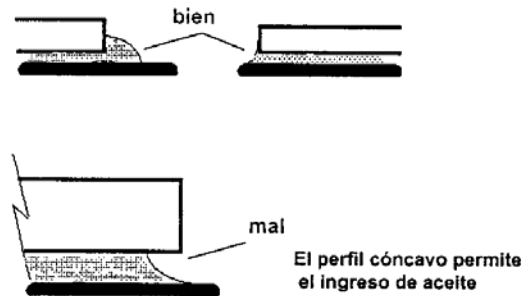


Fig. 9-19: Montaje de los discos para sensores.

La selección de adhesivos es esencial. Si el adhesivo no esta perfectamente curado, o pose características plásticas, flexibles, debe ser removido totalmente y cambiar el adhesivo. El muchos lugares se requiere utilizar la plantillad de seguridad “Material Safety Data Sheet (MSDS) para el manipuleo del adhesivo y solvente.

Los adhesivos Cianoacrilicos pueden utilizarse temporalmente, pero están sujetos a fallas por las expansiones térmicas de la superficie, por lo que no se recomiendan.

**9.3.8 Determinación de  $F_{max}$**

La resolución espectral se define como:

$$f_{res} = \frac{f_{max} - f_{min}}{\#lineasespectrales}$$

Donde:  $f_{max}$  = máxima frecuencia de interés  
 $f_{min}$  = mínima frecuencia de interés  
 $f_{res}$  = resolución de frecuencias por línea de filtro



Como es importante tener una razonable resolución para realizar el análisis espectral definitivo, se deben tomar los datos adquiridos con el acelerómetro, definir la  $f_{max}$  para utilizar óptimamente el display, e incrementar la efectividad en la detección y el análisis.

**Nota:** una alternativa es incrementar el número líneas cuando la frecuencia aumenta. Sin embargo, esto incrementara el tiempo de adquisición de datos y puede ser no deseado para la colección rutinaria.

Se sugiere medir ambos parámetros, velocidad y aceleración, usando la siguiente guía:

<b>Velocidad eje (RPM)</b>	<b>para velocidad, <math>f_{max}</math>:</b>		<b>para aceleración (g), <math>f_{max}</math></b>	
	<b>Hz</b>	<b>RPM</b>	<b>Hz</b>	<b>CPM</b>
< 1.200	<b>100</b>	<b>6000</b>	1 kHz	60 kCPM
1.200 – 2.400	<b>200</b>	<b>12000</b>	2 kHz	120kCPM
> 2.400 *	<b>500</b>	<b>30000</b>	5 kHz	300 kCPM

**Nota:** turbinas de gas, turbo cargadores, etc. Con muy alta velocidad de rotación, la  $f_{max}$  en aceleración se utiliza aproximadamente 10kHz (600 kCPM).

## **9.4 Configuración de alarmas**

Tipos de alarma:

- ☞ Límites de valores globales.
- ☞ Envoltentes de espectros.
- ☞ Bandas espectrales.
- ☞ Alarma de fase.

Los métodos de alarma y configuraciones de mediciones, deben ser adecuados para detectar eventos que brinden información, así sean datos normales asociados a operaciones correctas de los equipos. Para optimizar los beneficios de un programa de mantenimiento predictivo, se deben desarrollar técnicas sistemáticas de detección, que permiten una selección de los datos que indican eventos mecánicos específicos de interés, como la actualización de alarmas.

								v r.m.s. s/sv/s	v r.m.s. ind/s	Velocidad Vibración 10 - 10000 Hz > 400 r/min 12 - 10000 Hz > 120 r/min
								11	0.433	
								7.1	0.290	
								4.5	0.177	
								3.5	0.138	
								2.8	0.110	
								2.3	0.091	
								1.4	0.055	
								0.71	0.028	
								rigida	flexible	
Bombas > 15 kW radial, axial, diagonal				Máquinas medianas 15 kW < P ≤ 300 kW		Máquinas Grandes 300 kW < P < 50 MW		Tipo de Máquina		
Acople directo		Eje intermedio / Poleas.		Motores 160 mm ≤ H < 315 mm		Motores 315 mm ≤ H				
Grupo 4		Grupo 3		Grupo 2		Grupo 1		Grupo		
								Blue: Puesta en operación recientemente. Green: Operación para largo plazo. Yellow: Operación para corto plazo. Red: Vibración causando daños.		

**Tabla 9-1: Norma de severidad ISO 10816.**

Cuatro principios son usualmente usados para evaluar los valores globales de vibraciones:

☞ Norma ISO 10816

Se comparan los valores con los límites establecidos en la norma ISO10816 (tabla 9-1).

☞ Seguimiento de tendencia

Se compara el valor corriente con los obtenidos en un periodo de tiempo. El programa para registrar los valores de vibraciones provee facilidades para el ploteo de tendencias

☞ Comparación del espectro con el espectro de referencia (Baseline Comparison)

☞ Comparación con maquinas similares. Midiendo varias máquinas de tipo similar, bajo las mismas condiciones y juzgar los resultados por comparación.

En lo posible, se deben utilizar las cuatro opciones para evaluar el estado de una máquina. El seguimiento de tendencias siempre debe realizarse.

### 9.4.1 Severidad de la vibración

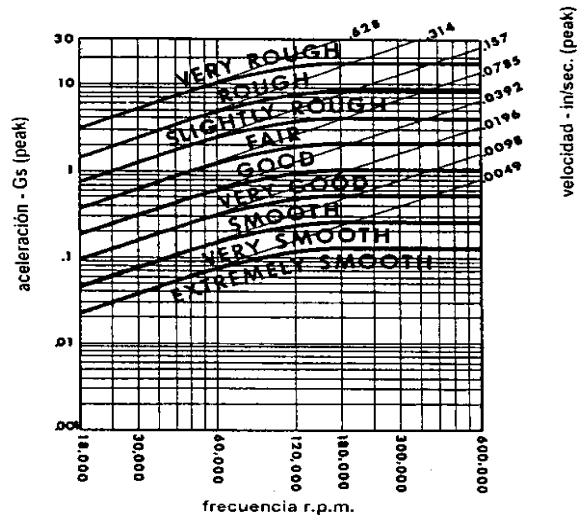


Fig. 9-20: Carta de severidad.

#### Comparación de tendencias

Probablemente el más eficiente y confiable método de evaluación de la severidad de las vibraciones, es comparar la lectura reciente, con los valores previos para el mismo punto de medición, que brindara los valores en función del tiempo. Esta comparación entre presente y pasado es sencilla, cuando los valores son graficados en tendencias (Fig. 9-20)

#### Comparación con el espectro de referencia (baseline)

Las mediciones almacenadas deben contener el espectro de referencia. Este valor se debe adquirir después de las reparaciones o cuando la máquina opere bien, o cuando sea nueva. Las mediciones siguientes son comparadas con la referencia para detectar cambios.

#### Comparaciones con otras máquinas

Cuando varias máquinas iguales son usadas en las mismas condiciones operativas, la evaluación debe realizarse en los mismos puntos y comparar los resultados.

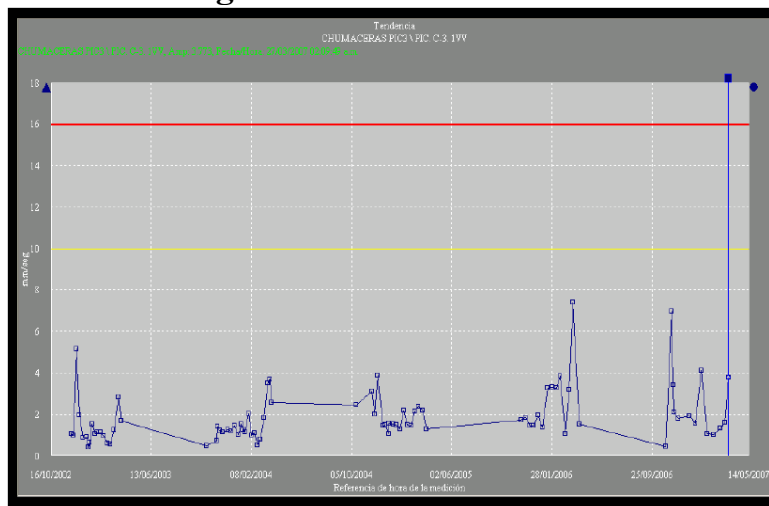
La carta de severidad de vibraciones provee una guía general en velocidad y aceleración para determinar la condición de máquinas típicas con relación de peso carcasa/rotor de 5:1

(T. C. Rathbone, John Mitchell, “Machinery Analysis and Monitoring”, Penwell Publishing Company, 1981).

Entre algunas otras normas y guías para aplicaciones específicas, que existe están por ejemplo en procesos petroquímicos las especificaciones API, las normas militares, etc.

En la Fig. 9-20, la frecuencia de rotación del eje (shaft speed) es usada únicamente cuando se asignan resultados en desplazamiento es lineal respecto de la frecuencia.

### 9.4.2 Tendencia del valor global



**Fig. 9-21: Grafica de tendencia global de vibración.**

Normalmente, es difícil determinar el nivel de alerta cuando se confecciona una nueva base de datos, debido a las variaciones en las características de las maquina, montaje, cargas. Etc. Generalmente el analista de mantenimiento predictivo utiliza normas (como las mencionadas en páginas previas). Se debe considerar dos aspectos de la aplicación de estas normas:

- ☞ Las normas deben ser dependientes de la frecuencia, en oposición a las establecidas para valores globales.
- ☞ Las normas deben referirse a máquinas específicas.

Es deseable establecer valores de alerta elevados para minimizar las alarmas, pero no demasiado como para perder excusiones críticas de las máquinas (Fig. 9-21). En un sentido conservativo, en el siguiente cuadro, se aconseja valores típicos para máquinas:

**VELOCIDAD**

**A1 alerta global = 7 mm/s RMS**

**A2 peligro global = 11 mm/s RMS**

**Nota:** 11 mm/seg. Es considerado inseguro para la operación de la máquina y del personal.

**ACELERACION**

**A1 alerta global = 2 Gs**

**A2 peligro global = 3.5 Gs**

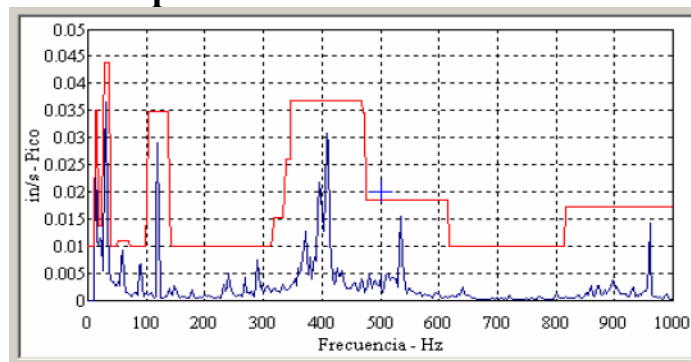
**ACELERACION CON ENVOLVENTE**

	<u>filtro III</u>	<u>filtro IV</u>
<b>A1 no satisfactorio</b>	= 4-10 gE	15-75 gE
<b>A2 no admisible</b>	= 10+ gE	75+ gE

\*\* Para valores de aceleración con envolvente (gE) es recomendable los valore Peak-Peak (pico-pico).

Importante: estos niveles de alerta son recomendables para base de datos preliminares. Luego deben ser modificados de acuerdo a los valores obtenidos en sucesivas mediciones de cada máquina, en condiciones normales. Los valores de envolvente varían con el diámetro del eje y la velocidad.

**9.4.3 Envoltente de espectro**



**Fig. 9-22: Envoltente de espectro.**

Una línea envolvente es sobreimpresa sobre el espectro de referencia de cada punto de medición (normalmente es usado el espectro de referencia). Este espectro envolvente

permite un pequeño aumento debido a la velocidad o cambio de potencia, con una amplitud preseleccionada, ver Fig. 9-22.

Un espectro típico permite una variación en frecuencia del 5% de la velocidad, y 3% en la amplitud de frecuencias discretas. Si alguna componente del espectro traspasa la envolvente establecida, se concreta un estado de alarma. Este metodo particular requiere datos históricos de la máquina.

#### 9.4.4 Bandas espectrales

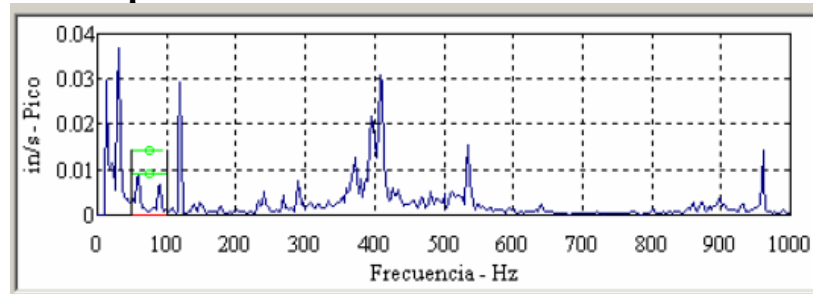


Fig. 9-23: Bandas espectrales.

El análisis de bandas espectrales es usado en aquellas aplicaciones en las cuales se debe asegurar la calidad, o la condición de monitoreo de máquinas de velocidad variable. Las bandas permiten aislar frecuencias específicas para la detención de fallas esperadas (ver Fig. 9-23)

Hay dos tipos de alarma de bandas espectrales:

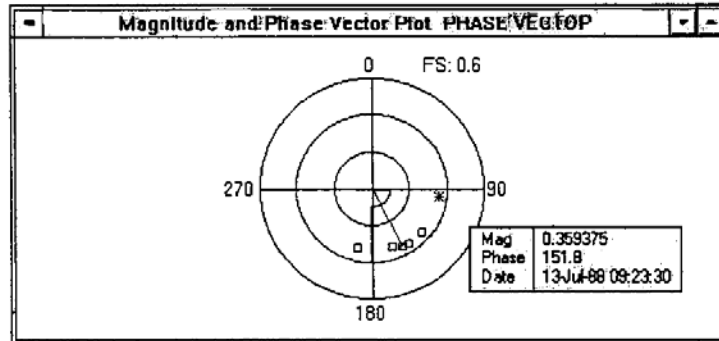
**Nivel absoluto:** permite especificar la máxima amplitud permitida de algún pico dentro de la banda. Si algún pico es igual, o supera el nivel, se establece la alarma.

**Potencia de la banda:** calcula la energía total o potencia, que se genera en cada banda por todos los picos (usando el mismo cálculo que para el valor global de todo el espectro)

Se definen las frecuencias mínimas y máximas con el software, o en función de la frecuencia rotacional (por ejemplo, 1 x RPM a 5 x RPM). Si en las frecuencias máximas y mínimas son establecidas en función de las r.p.m., la banda se moverá en forma proporcional a los cambios en velocidad. Esto es esencial para monitorear rangos de

frecuencias específicas de interés (por ejemplo, defectos de rodamientos o engranajes), sobre máquinas de velocidad variable.

### 9.4.5 Alarmas de fase



El diagrama polar (Fig. 9-24) muestra la amplitud y la fase del vector de la vibración. En el diagrama polar, una alarma es establecida cuando la cabeza del vector sale de la región predefinida de aceptación.

El diagrama posee zona de aceptación, de alerta y peligro para la medición de amplitud y fase de 4 armónicas. Para cada una de ellas, se define:

- Magnitud mínima.
- Magnitud máxima.
- Ángulo de fase mínimo.
- Ángulo de fase máximo.

### 9.4.6 Criterios de excepción

El software ofrece varios tipos de indicaciones de alarmas a partir del criterio de excepción.

Las bases de datos de algunos programas permiten configurar hasta 7 tipos de alarmas:

1. **alarma global.**
2. **alarma por ángulo de fase.**
3. **alarma envolvente de espectro.**
4. **alarma por bandas espectrales.**

El criterio de excepción provee estas alarmas adicionales:

5. **alarma proyectada:** una alarma se establece como excepción, si el valor proyectado alcanza la alarma global, en un periodo de tiempo específico.
6. **alarma estadística:** para una cantidad mínima especificada de valores globales medidos, se calcula el promedio y la desviación estándar. Esta es multiplicada luego por el valor preestablecido de desviaciones, por ejemplo 3, la suma del valor medio más las 3 desviaciones estándar, es la alarma estadística. Si el valor corriente supera a este, es considerado un valor en excepción.
7. **alarma de porcentaje de cambio:** esta alarma se establece como excepción, si el porcentaje de cambio entre las dos ultimas mediciones, superan un porcentaje especificado.

## 9.5 Análisis de espectros y análisis de fase

### 9.5.1 Análisis de espectro FFT

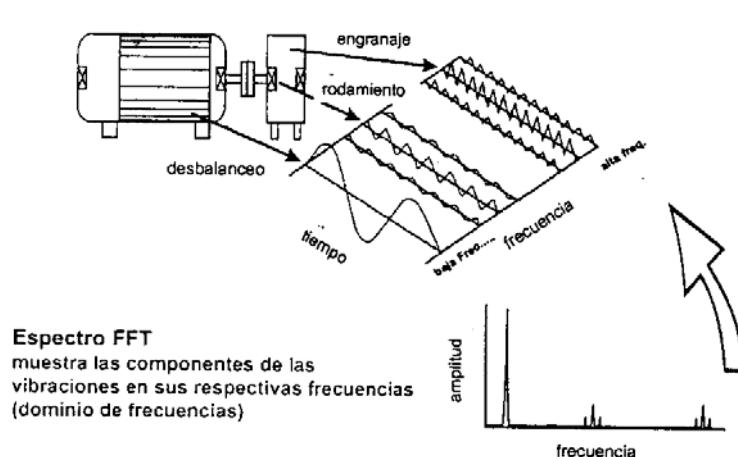


Fig. 9-25: Componentes de vibración.

Varios problemas de máquinas generan vibraciones en frecuencias específicas (Fig. 9-25). En el ejemplo de arriba, el desbalanceo produce el valor mayor en baja frecuencia (1 x r.p.m.).

Los problemas en el cojinete producen señales en altas frecuencias y de mucha menor amplitud.

La frecuencia de engrane se produce en **Z x r.p.m.**



El método más usado para ver las señales vibratorias de las máquinas, es la aplicación de la Transformada Rápida de Fourier (FFT). En términos no matemáticos, esto significa que la señal global es descompuesta en sus componentes individuales, las cuales son graficadas en función de la frecuencia.

El espectro FFT es una herramienta muy utilizada. Si el problema en la máquina existe, el espectro FFT provee información que ayuda a la ubicación de este, y mediante el seguimiento de tendencias se puede predecir cuando el problema comienza a ser crítico.

Debido a que se conocen que ciertos problemas ocurren a determinadas frecuencias, se analiza el espectro FFT para detectar cambios en las amplitudes, dentro de rangos de frecuencias de interés.

### **9.5.2 Técnicas de análisis espectral**

El análisis FFT permite analizar amplitudes de vibraciones de varias componentes de frecuencias. Se puede identificar vibraciones a determinadas frecuencias. Dado que conocemos los problemas que generan vibraciones a frecuencias específicas, podemos utilizar esta información para diagnosticar la causa de la vibración excesiva.

Se necesita cubrir dos etapas cuando se utiliza un espectro FFT

- ☞ **Colectar información necesaria.**
- ☞ **Analizar el espectro.**

#### **Colectar información necesaria**

Cierta información básica se necesita antes de diagnosticar un espectro FFT, por lo tanto se debe identificar todos los componentes de una máquina que puedan causar vibraciones (Fig 9-26).

- ☞ Si las máquinas están conectadas a una bomba o a un ventilador, conocer el número de alabes o aspas según sea el caso.
- ☞ Si hay rodamientos, presentes, conocer sus características para determinar sus frecuencias de falla.

- ☞ Si hay engranajes, conocer el número de dientes.
- ☞ Si hay correas, se necesita conocer la longitud de las mismas.
- ☞ Si la máquina opera con otra muy próxima, se necesita conocer la frecuencia de la segunda, dado que puede tener mucha influencia debido a que las vibraciones son conducidas a través de las estructuras.
- ☞ Si la máquina está montada verticalmente u horizontalmente.
- ☞ Si la máquina o algún componente está en voladizo.
- ☞ Tomar los datos de las placas y de la información existente en otras fuentes (manuales, planos).

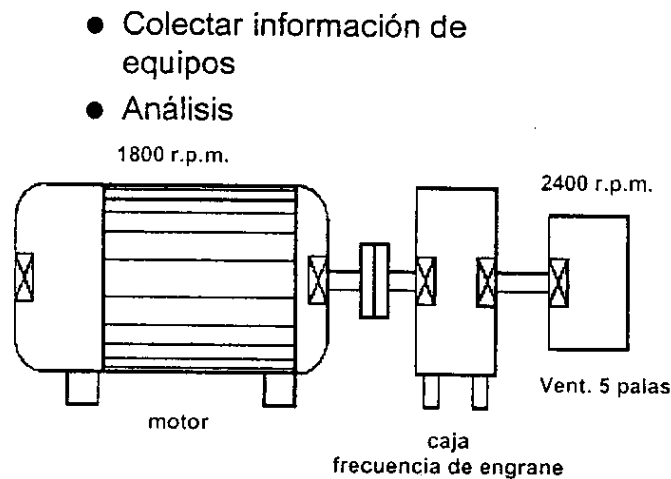


Fig. 9-26: colección de información de los equipos.

### Si es posible, obtener los datos históricos de las máquinas

- ☞ Buscar valores de vibraciones previamente grabados, FFT datos de la sala de control, o tendencias globales.
- ☞ firmas registradas (espectro de referencia).
- ☞ Hablar con los operadores. A veces informan acerca del problema original (cambio de acoplamiento, incremento de flujo, limpieza de ventiladores, etc).

### Identificar la frecuencia de rotación de las máquinas

- ☞ El conocimiento de la velocidad de la rotación es crítico cuando se analiza un espectro FFT.

- ☞ Tomar la velocidad de instrumentos fijos en la máquina o de la sala de control, o en caso de no poseer esa indicación; usar un tacómetro manual que puede ser el mismo colector de datos.
- ☞ Observar los picos en el espectro, a 1500 o 300 r.p.m si el motor es de inducción. Los motores típicamente operan a esa frecuencia.
- ☞ En un espectro FFT, el pico correspondiente a la velocidad, normalmente es el primero desde la izquierda. Identificar ese pico y observar si hay armónicas en (2X, 3X, 4X).

Las técnicas de análisis permiten identificar que tipo de información brindan los espectros FFT, y que producen en el, los diferentes parámetros, tales como desplazamiento, la velocidad, la aceleración, la envolvente, el metodo SEE, etc.

También se debe analizar en que posición del sensor se obtiene los datos fundamentales: horizontales, vertical, axial, en la zona de carga.

Debe verificarse que los valores obtenidos sean consistentes para que la comparación sea válida.

### **Análisis**

#### **Un análisis eficiente requiere:**

- ☞ Adquirir datos de vibraciones en tres planos, en cada cojinete (H, V, A). Como mínimo lectura de velocidad y envolvente.
- ☞ Cuando sea posible, adquirir medición de fase relativa. Esto suele tener gran importancia en el diagnóstico.
- ☞ Evaluar las vibraciones globales de toda la máquina:
  - Donde esta la fuente de vibración (mayor amplitud).
  - Que dirección de medición es más importante.
  - La frecuencia dominante tiene relación con los elementos rotantes.

Una vez que la información arriba mencionada es conocida, se puede proceder a analizar el espectro. El análisis usualmente utiliza el proceso de eliminación.

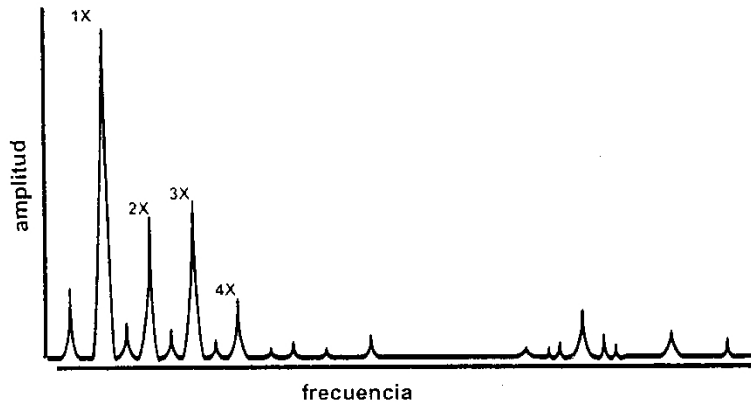


Fig. 9.27: Armónicos de la frecuencia de rotación.

**Una vez identificada la frecuencia de rotación, determinar el rango de frecuencias del espectro**

- ☞ Identificar las armónicas de las r.p.m (1X, 2X, 3X, etc.).
- ☞ Identificar las frecuencias de fallas de rodamiento.
- ☞ Identificar frecuencias de alabes de ventiladores.
- ☞ Identificar el número de dientes de los engranajes.
- ☞ Identificar la frecuencia del impulso de la bomba.
- ☞ Identificar vibraciones de maquinas adyacentes.
- ☞ Con motores eléctricos, identificar picos a frecuencia de línea. Determinar si es eléctrico o mecánico.

**Verificar frecuencias sospechosas de fallas**

El espectro puede producir picos a frecuencias identificadas como falla (ver Fig. 9-27). Estos picos pueden o no, representar fallas. Obsérvese si hay armónicas de la frecuencia de falla.

- ☞ Si el pico aparece a la frecuencia fundamental de falla, y otro pico aparece al doble, seguramente la falla existe.
- ☞ Si no aparece un pico a la frecuencia fundamental de falla, pero esta presente a dos, tres y tal vez cuatro X, es una indicación válida de frecuencia de avería.

☞ La lectura de fase es muy útil para identificar el problema.

Para rodamientos y engranajes deben evaluarse HFD y envolvente (también dan indicaciones de cavitación y roce)

### **Determinar la severidad de la falla**

Un método para determinar la severidad de la falla es comparar la amplitud con lecturas anteriores, tomadas en condiciones similares.

Otro, es comparar la amplitud con otras lecturas obtenidas de máquinas similares, operando en las mismas condiciones, dado que una lectura mayor a lo normal indicara problemas.

### **9.5.3 Modelo espectral**

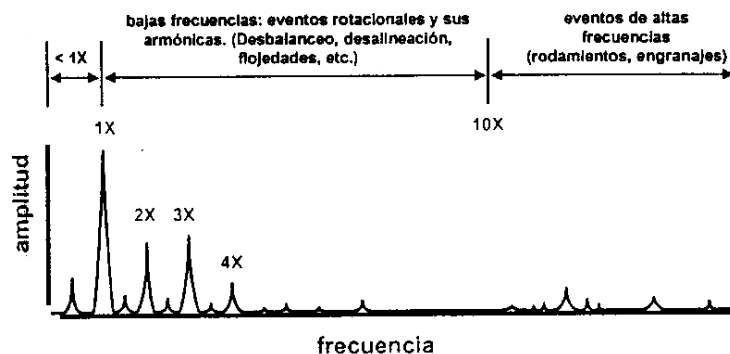


Fig. 9-28: Modelo Espectral (velocidad).

A través del tiempo, en los sucesivos análisis, se van reconociendo características espectrales que representan problemas específicos (Fig. 9-28).

Una guía general para máquinas típicas puede ser:

#### **Menor de 1X de la velocidad de rotación**

- Defecto de la jaula del rodamiento (típicamente alrededor de 1/3 de las r.p.m)
- Rose de metal con metal.
- Remolino de aceite (Oil Whirl).
- Recirculación en bombas.
- Resonancia (muy común).

#### **1X de la velocidad de rotación y armónicas hasta 10X**

- Desbalanceo (1X).
- Desalineación (1X – 2X).
- Eje torcido (1X, 2X).

Flojedades (1X – 10X).  
Alabes de ventiladores (número de álabes x r.p.m.).  
Cojinete flojo.  
Resonancia.

**Eventos de alta frecuencia (mayores de 10x velocidad de rotación)**

Daños en rodamientos (frecuencia de defecto y armónicas).  
Engranajes (numero de dientes x r.p.m.)  
Cavitación.

**9.5.4 Ejemplo de espectros**

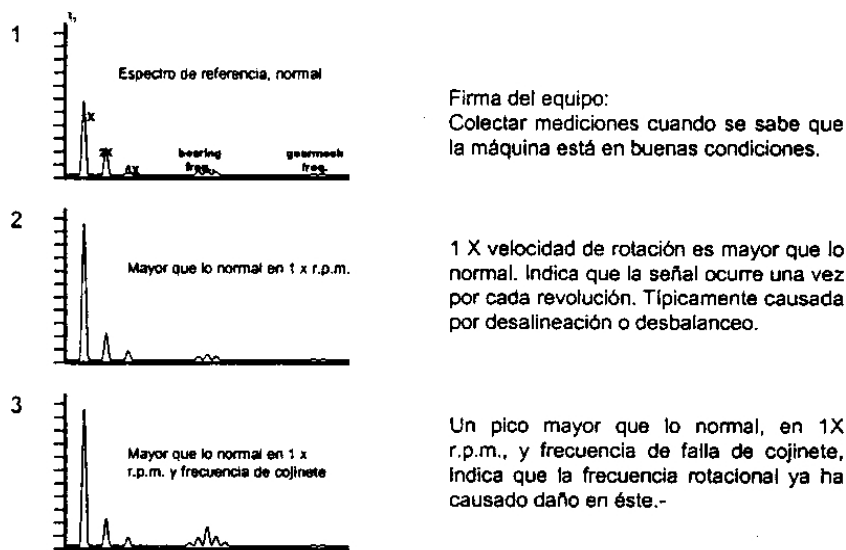


Fig. 9-29: ejemplo de espectros.

**Ejemplo 1**

Es un espectro FFT normal (ver Fig. 9-29(1)). Este fue obtenido con una operación normal de la maquina, en la cual no se observan problemas. Típicamente, el pico de la izquierda es la frecuencia de rotación (1 X). Ocurre por que es normal un pequeño desbalanceo en el rotor. Otros picos en frecuencias aleatorias, representan vibraciones no perjudiciales. Otros son armónicos de las rpm. , y la frecuencia natural de la maquina y rotor.

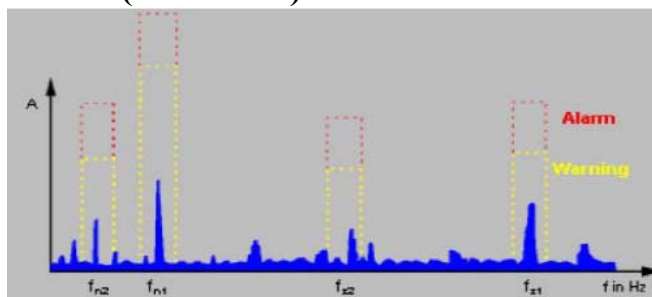
## **Ejemplo 2**

Muestra como el espectro FFT comienza a indicar una fuente de vibraciones excesivas. El FFT del ejemplo 2(ver Fig. 9-29(2)), fue obtenido cuando la máquina tenía un desbalanceo. En este, el pico a la velocidad de rotación se incrementa. Esta vibración es llamada fundamental, o de primer orden, o 1X las armónicas están a dos, tres, n, veces la velocidad de rotación. Estas se denominan de segundo orden, etc.

## **Ejemplo 3**

El pico 1X de la frecuencia del cojinete, mas alto de lo normal, indica que el desbalanceo ya le ha causado daño.

### **9.5.5 Bandas laterales (sidebands)**



**Fig. 9-30: Bandas laterales.**

Muchas veces, los espectros FFT, alrededor de una frecuencia dominante aparecen frecuencias laterales a espacios similares una de otra (Fig. 9-30). Estas representan modulaciones y son una herramienta importante para el análisis. Por ejemplo, ayuda a identificar problemas eléctricos de motores, y brindan información sobre la severidad de los defectos de engranajes y rodamientos.

#### **Defectos de rodamientos**

Como se describirá luego con mayor profundidad (en la sección 9.8 de monitoreo de rodamientos), las bandas laterales (sidebands) pueden proveer una buena indicación de la severidad del defecto del rodamiento o engranaje. A medida que el defecto del rodamiento avanza, las bandas crecen alrededor de la fundamental de la falla, y de sus armónicas (en espectros de velocidad y aceleración). Aumentos en las bandas laterales, implican aumento de la avería.

**Nota:** para defectos en la pista interior, las bandas están espaciadas 1x rpm. Esto es causado por la modulación de la frecuencia de rotación sobre la pista del rodamiento.

### 9.5.6 Armónicas

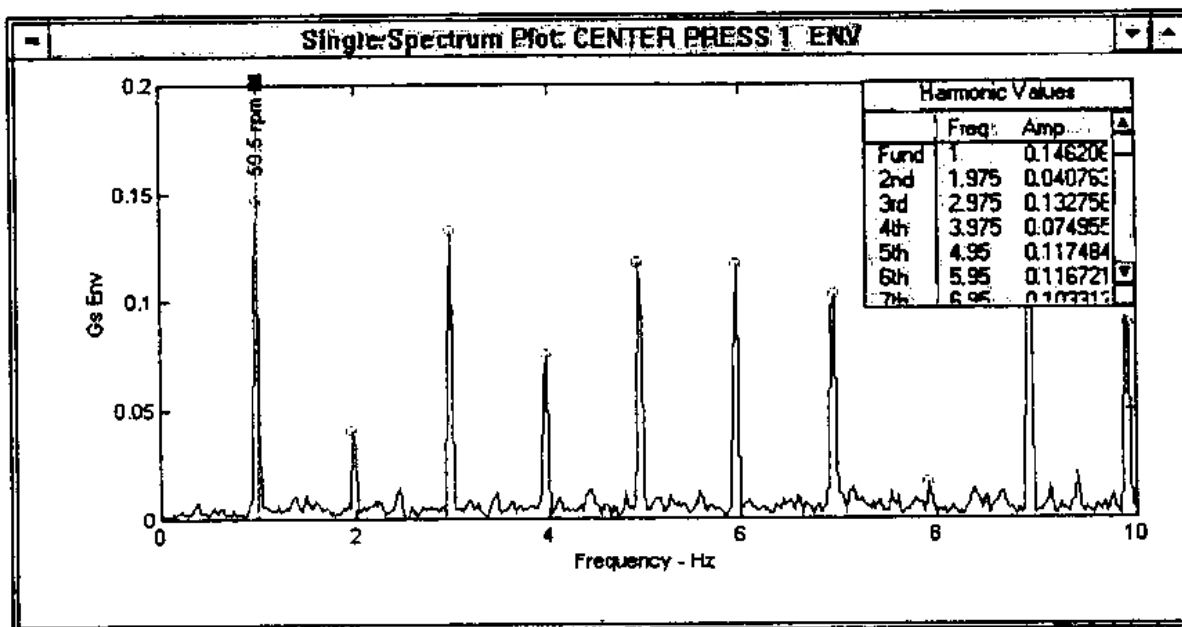


Fig. 9-31: Armónicas de frecuencia fundamental.

*Una armónica* es una frecuencia que es múltiplo exacto de la fundamental (Fig. 9-31).

Es importante notar que con los defectos en las bolas del rodamiento, las armónicas de la fundamental del defecto, típicamente aparecen primero (generalmente a 5 – 40X frecuencia de la velocidad). Estas armónicas del defecto, son el indicador más temprano de su presencia.

### 9.5.7 Diagrama de cascada

La mayoría de los software de mantenimiento predictivo, permiten al operador observar los múltiples espectros de un punto, tomados en el tiempo. Este tipo de gráficos es llamado cascada (cascade o waterfall) y es usado para seguir las tendencias de cambios espectrales.



En el gráfico de cascada de la Fig. 9-32, la medición en el ventilador de 1x muestra un incremento en amplitud sobre las primeras cuatro lecturas, indicando un problema en 1x rpm (probablemente desbalanceo por suciedad o rotura de una aspa).

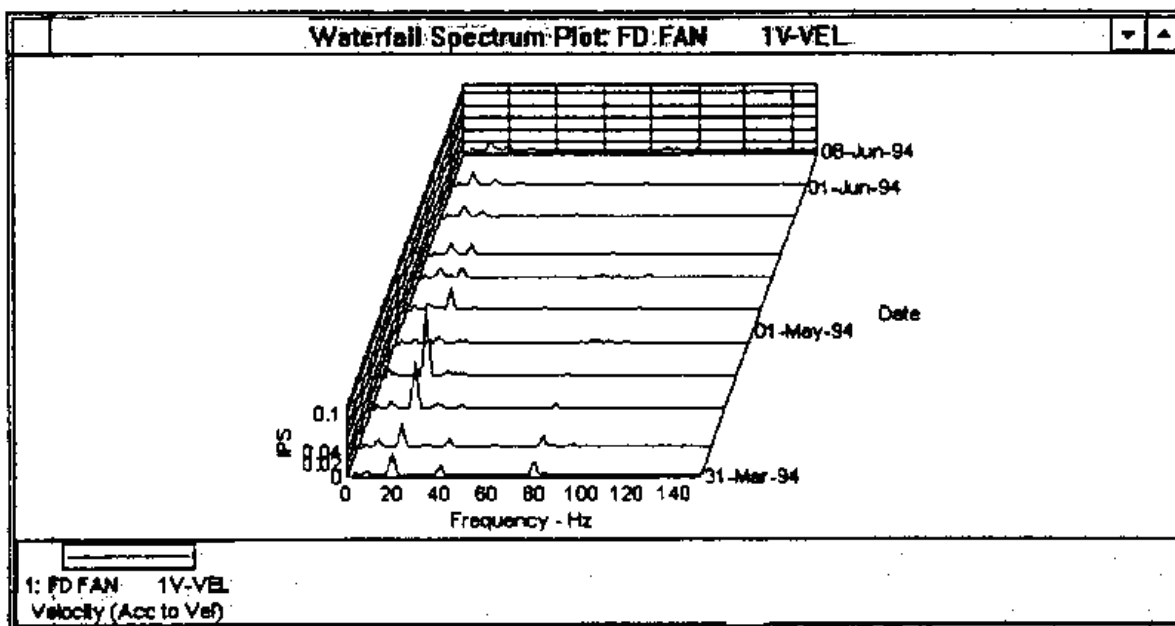


Fig. 9-32: gráfica de cascada.

El ventilador fue reparado después de la cuarta lectura, mostrando una amplitud de 1X baja, en los espectros siguientes.

### 9.5.8 Fase

La fase es una medición, no un método de proceso. Provee información respecto de cómo una parte de la máquina vibra, con respecto de la otra.

La fase indica la diferencia angular entre una marca establecida en el eje de rotación, y la señal de vibración. Esta relación provee una información de mucho valor, adicionada a la amplitud, órbita del eje, y la posición del eje. También es muy usada para balanceo y análisis.

Cuando se mide el ángulo de fase en dos posiciones de la máquina, y se analiza la relación entre las mismas, tomamos conocimientos de cómo se mueve el rotor. Esta información es

muy útil para determinar la causa de la vibración, ya que algunos problemas de máquina producen relaciones de fase específicas (Fig. 9-33).

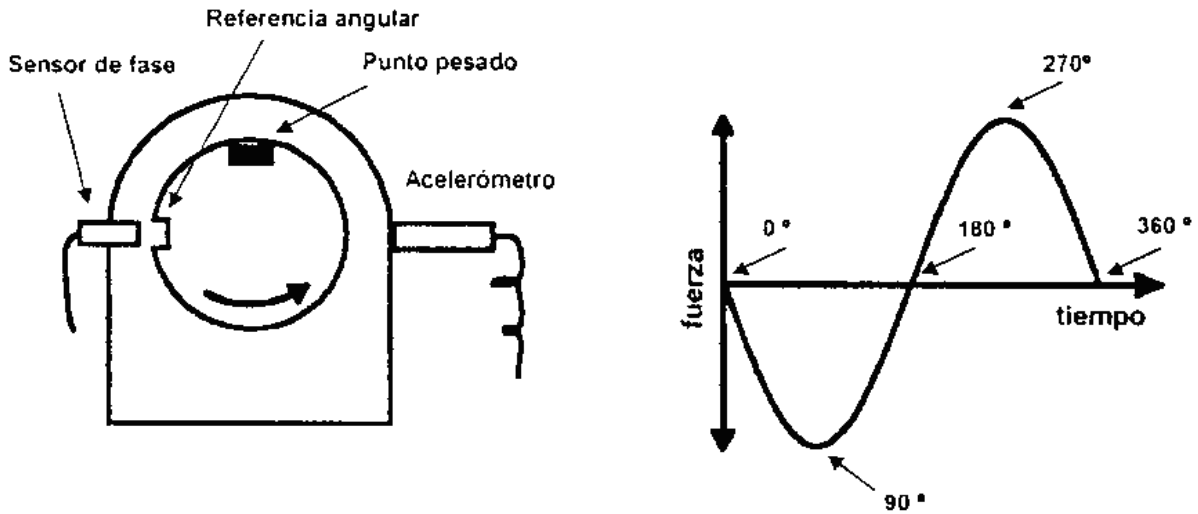


Fig. 9-33: Angulo de fase.

Por ejemplo:

- ☞ Un desbalanceo puramente “estático”, producirá lecturas en fase en ambos extremos, pero no en oposición.
- ☞ En cambio, un desbalanceo en “cupla”, produce lecturas con 180° de desfase.
- ☞ Una combinación de desbalanceo estático y de cupla, produce una lectura de fase diferente en ambos extremos, pero no en oposición.

Este tipo de información es valorable cuando se balancea una máquina o cuando se analiza la causa raíz del desbalanceo. Otros problemas de máquina (desalineación, eje doblado, etc.), también producen una relación específica de fase entre mediciones. No solamente entre los distintos cojinete del rotor o a través del acoplamiento, también entre los plano vertical, horizontal o axial de un mismo punto.

### 9.5.9 Interpretación de la fase

Para propósitos de análisis, en la Fig. 9-34 se observa que un acelerómetro censa la fuerza de desbalanceo, y un tacómetro la posición del eje.

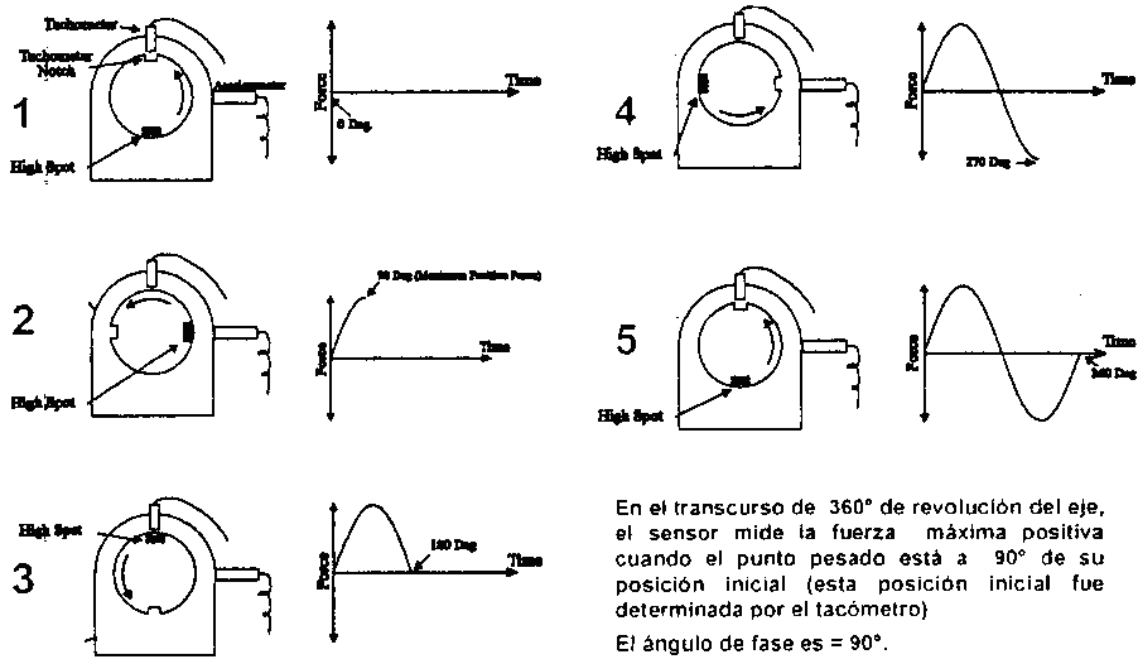


Fig. 9-34: interpretación de la fase.

Una marca es colocada en el eje. El tacómetro envía un pulso (trigger), cuando la marca se enfrenta con el tacómetro, y este pulso indica la colección de datos.

### Definición

*El ángulo de fase* es el ángulo (en grado), que el eje cubre desde el inicio de la toma de datos hasta que el sensor experimenta la máxima fuerza positiva.

La fase del ángulo es 90°, si el sensor tiene una fuerza positiva máxima 90° después que se inicia la colección de datos por el tacómetro.

### Ejemplo

En la Fig 9-34(1), el tacómetro censa la marca en el eje e inicia la colección de datos. En este punto la fuerza es igual a cero.

En la Fig. 9-34(2), el punto pesado rota 90° a partir de la posición del sensor. En este punto, la fuerza de desbalanceo produce la lectura máxima positiva del sensor.

**Nota:** cuando el punto pesado se aproxima al sensor, esa fuerza es considerada en dirección positiva.

En la Fig. 9-34(3), el punto pesado rota 90° adicionales, la fuerza experimentada por el sensor es nuevamente cero.

En la Fig. 9-34(4), el punto pesado se encuentra en el máximo negativo, a 270°.

**Nota:** cuando el punto pesado se aleja del sensor, esta fuerza es considerada en dirección negativa.

En la Fig. 9-34(5), el punto pesado rota 90° adicionales hasta completar los 360° de una revolución. La fuerza experimentada por el sensor es nuevamente cero.

*El ángulo de fase en esta medición es de 90°*

### 9.5.10 Medición de fase

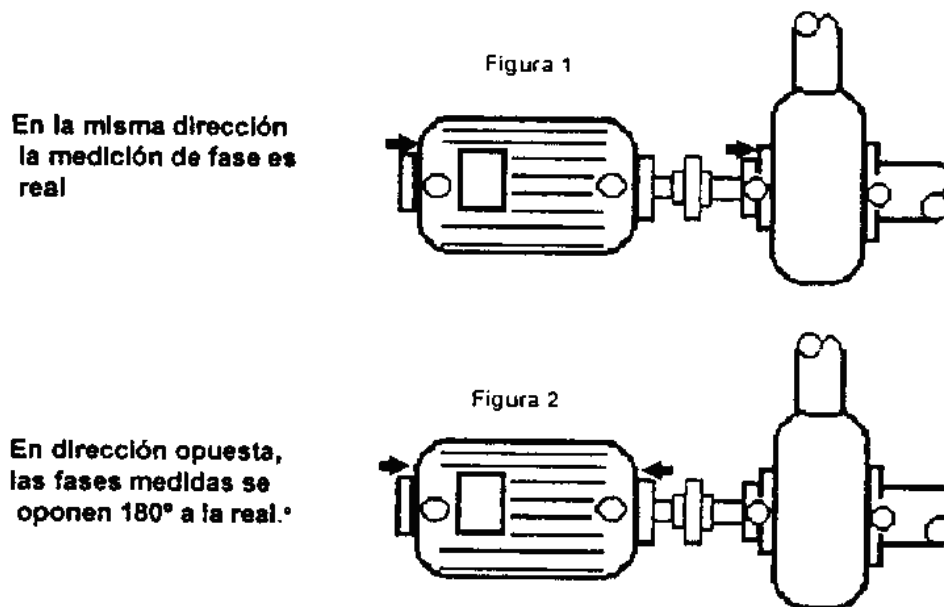


Fig. 9-35: Medición de fase (dirección del sensor).

Cuando se comparan dos mediciones, es importante considerar el sentido de los sensores. Si el sensor en ambas mediciones tiene la misma dirección, entonces las lecturas de fase son correctas.

Por ejemplo, si el motor y la bomba de la (Fig. 9-35) están vibrando en fase, la lectura de la fase dará esa indicación exactamente.

Del mismo modo, si ambos componentes están 180° fuera de fase, la lectura nos dará la misma indicación Fig. 9-35(1). En ambos casos los sensores están montados en la misma dirección.

A veces no es posible montar el sensor en el mismo sentido, por lo tanto, si están en dirección opuesta, la lectura de la fase diferirá en 180°.

Por ejemplo, si el motor de la Fig. 9-35(2) vibra en fase, las lecturas tomadas con los sensores diferirán en 180°. De la misma manera, si los equipos vibran desfasados 180°, las lecturas en cambio estarán en fase.

Cuando se realicen mediciones de fase, se debe tratar de orientar el sensor en ambos puntos de medición, en la misma dirección. Si no es posible, se debe mentalmente recordar que la lectura real está a 180°.

Si la lectura es  $< 180^\circ$ , adicionar  $180^\circ$  a la misma para corregirla.

Si la lectura es  $> 180^\circ$ , restar  $180^\circ$  a la misma para corregirla.

### **9.5.11 Análisis de fase**

Para algunos problemas específicos de máquinas, existe una relación de fase entre dos puntos de medición. El diagrama siguiente de la Fig. 9-36 es un ejemplo ilustrativo de esa relación de fase.

Se trata de un conjunto rotor/eje entre dos cojinetes. La medición de fase esta tomada en el mismo plano (axial) en cada cojinete para determinar la relación de fase a través del eje. La

dirección y el plano de medición para cada lectura, esta indicada con flechas en cada cojinete.

### (Fase axial en una máquina)

Relación de fase entre dos cojinetes,  
lectura axial en los extremos del eje: "en fase"

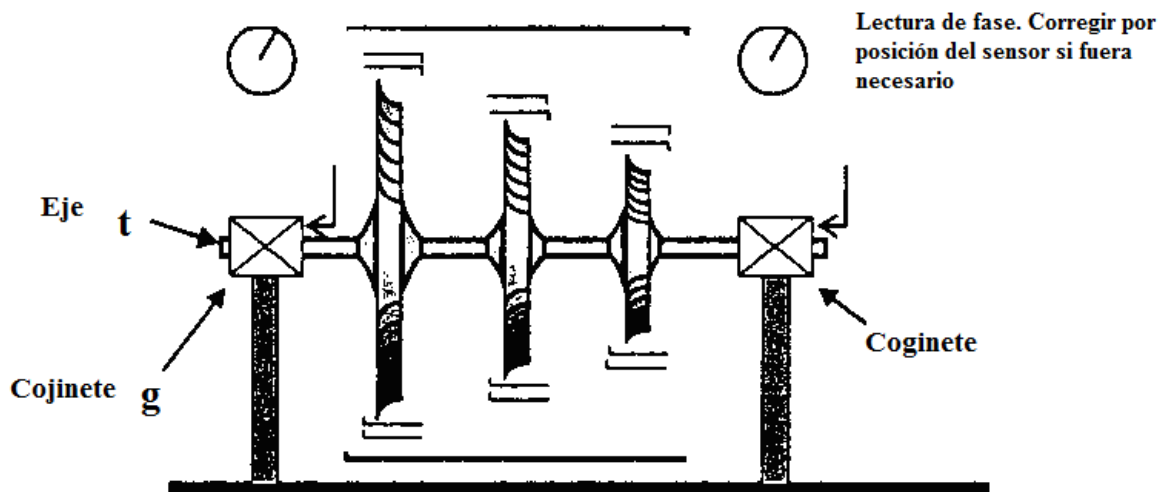


Fig. 9-36: Fase axial en una máquina.

El resultado de esa medición de fase, es mostrado arriba de cada punto, con un círculo que tiene una marca. El círculo simboliza la rotación del eje, y la marca indica el punto pesado de la vibración (tomada con lámpara estroboscópica o sensor óptico)

**Nota:** es importante resaltar que la posición del sensor (horizontal, vertical o axial), debe ser la misma para mediciones tomadas a través de la máquina (como en el ejemplo).

La relación de fase entre las dos dimensiones, esta determinada por la comparación de ambas con la única posición de la marca de referencia. Por ejemplo, si las marcas están en la misma posición respecto de la referencia, para cada medición, estas están en fase.

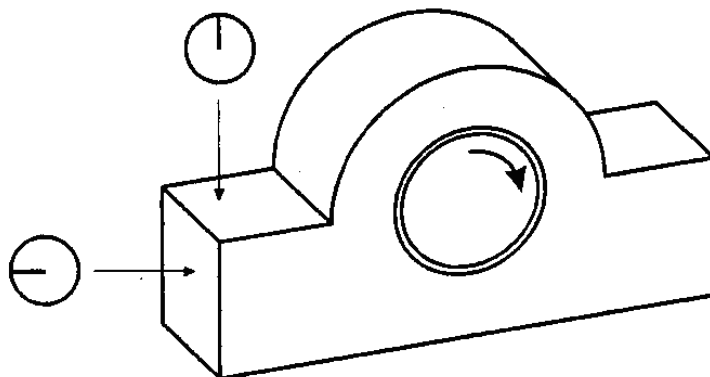
Si una marca esta en oposición con la otra marca, la medición esta 180° fuera de fase.

Del mismo modo, si una marca en una oposición difiere en 90° de otra marca, luego la medición está desfasada 90°.

**Nota:** todos los valores de fase difieren más o menos 30°, debido a variaciones mecánicas.

En el ejemplo siguiente, la comparación de fase se realiza entre dos planos de mediciones, en el mismo cojinete. La posición del sensor esta indicada por la flecha.

(Relación de fase entre planos vertical y horizontal de un cojinete)



**Relación de fase entre ambos planos radiales: "90 grados"**

**Fig. 9-37: Relación de fase entre dos planos.**

La medición de fase resultante esta nuevamente mostrada con las marcas dentro de los círculos (Fig. 9-37). El círculo simboliza la rotación del eje, y la misma marca, el punto pesado de la vibración.

Esta medición es muy útil para diferenciar si el origen de la vibración corresponde al rotor (un vector rotativo como el desbalanceo), o al estator o carcasa de la máquina (un vector estático como la desalineación).

## **9.6 Métodos de procesamiento de señales**

### **9.6.1 Procesamiento de señales**

Cuando se observa en el dominio de la frecuencia, los defectos repetitivos de engranajes o rodamientos, son típicas señales vibratorias de baja energía, en el rango de alta frecuencia, las bajas amplitudes se deben a que son provocadas por defectos de naturaleza pequeña, a veces microscópicas, y la frecuencia alta obedece a que hay varios impactos por revolución. También por que esas señales son impactos de corta duración, que generan armónicas en rangos muy elevados.

- Envolvente
- SEE (spectral emitted energy)
- HFD (high frequency detection)

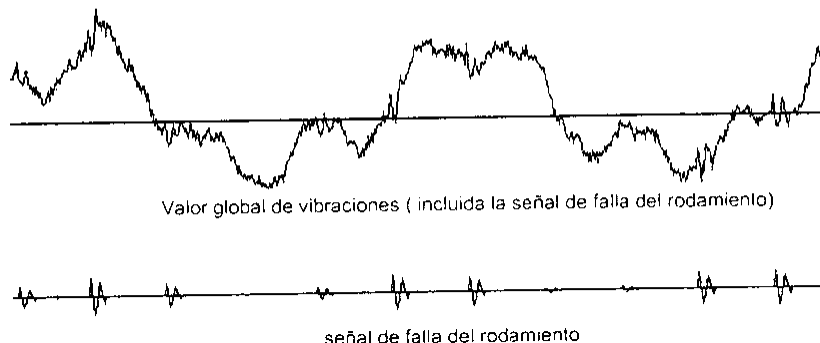


Fig. 9-38: Señal de falla de un rodamiento.

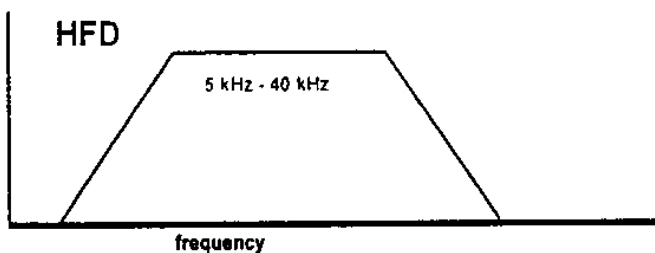


Fig. 9-39: Rango de alta frecuencia.

Generalmente, las vibraciones de baja frecuencia y alta energía enmascaran las amplitudes mucho más bajas debidas a fallas de rodamiento (ver Fig. 9-38) o engranajes, y por ello no son detectadas.

Esto ha dado origen a varias técnicas de procesamiento de señales (Ej. Ver Fig.9-40), que tratan de filtrar las vibraciones de baja frecuencia, con el fin de aislar y resaltar las señales provenientes de rangos de alta frecuencia como la de la Fig. 9-39.

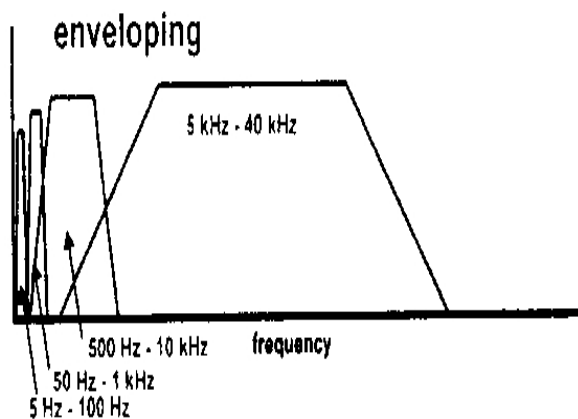


Fig. 9-40: Método de envolvente.



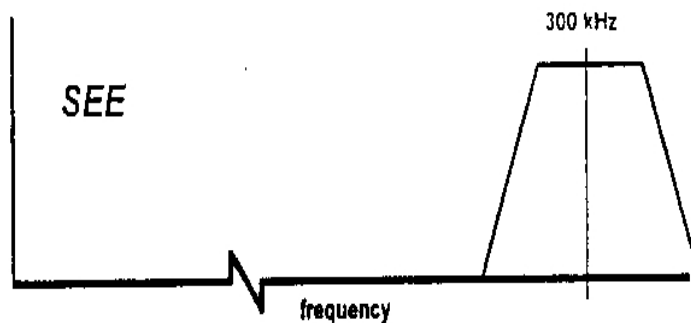


Fig. 9-41: Emisión de energía espectral.

### 9.6.2 Envolvente

La envolvente de aceleración, o “demodulación”, es la técnica de procesamiento de señal, que provee una gran ayuda al analista, para determinar la condición de los equipos rotativos. Este método de procesamiento de señal, permite la detección de impulsos repetitivos de baja energía, tales como los defectos de rodamientos y engranajes, con mucha anticipación respecto a los métodos tradicionales de análisis (ver Fig. 9-42).

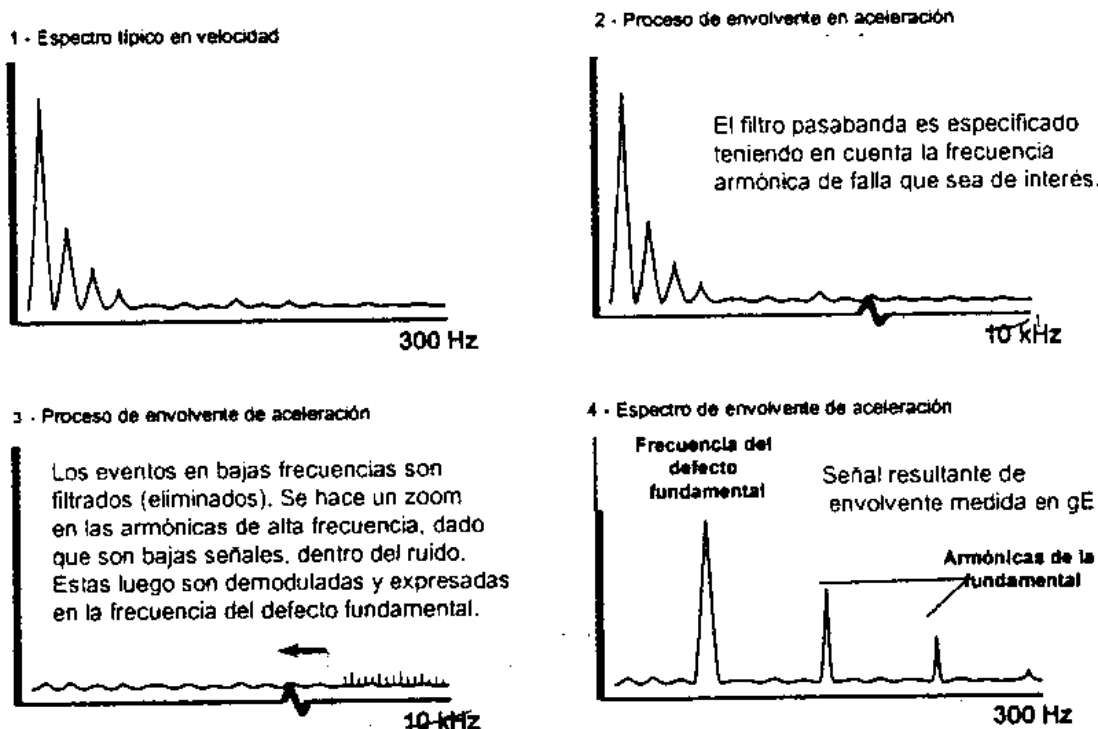


Fig. 9-42: Proceso de la envolvente de un espectro.

**Nota:** debido a la detección temprana de defectos de rodamientos, el personal de mantenimiento tiene la oportunidad de aplicar medidas correctivas que pueden extender la vida del rodamiento.

En términos simples, el proceso envolvente de aceleración, se inicia con el filtrado de las vibraciones de baja frecuencia. Luego procesa las armónicas generadas por señales repetitivas que, ocurre en una banda de alta frecuencia específica por el usuario, (2). Las señales armónicas se inician en las primeras etapa del defecto, en el rango de alta frecuencia, normalmente 5 a 40 veces la frecuencia fundamental del defecto. (3)

Cuando esas armónicas son detectadas, la envolvente muestra las señales en un espectro en el rango de frecuencia del defecto fundamental. El resultado es un espectro de baja frecuencia, con eventos de dicha frecuencia fundamental del defecto, y sus armónicas (4)

Las señales de impulsos de defectos son generadas con más energía en la zona de carga del rodamiento. Por esta razón, es muy importante para obtener mejores resultados en la medición de envolvente, posicionar el sensor en la zona de carga, o lo mas cercano posible a ella.

Los defectos en rodamientos generan impulsos repetitivos de baja energía en alta frecuencia, los cuales solo pueden ser observados con anticipación a través de la envolvente de aceleración.

### 9.6.3 Filtro de envolvente

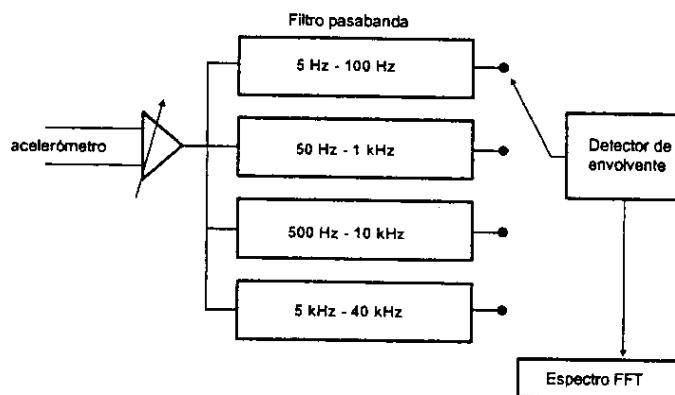


Fig. 9-43: Filtro de la envolvente.

La clave para predecir con anticipación las fallas de rodamientos, es detectar la frecuencia de baja amplitud de sus defectos, y las armónicas, sin incluir la señal de amplitud originada por la rotación del equipo. Para cumplir con esto, un sistema moderno, permite al usuario seleccionar cuatro filtros pasa bandas para la medición de envolventes (ver Fig. 9-43).

Cada filtro pasa banda de la medición, es seleccionado basándose en la frecuencia de rotación del eje y en el rango de la frecuencia del rodamiento o engranaje de interés.

Los filtros son:

5	Hz a	100	Hz
50	Hz a	1	kHz
500	Hz a	10	kHz
5	Hz a	40	kHz

La selección de uno de estos filtros, permite al analista aislar las frecuencias de interés específicas (por ejemplo rodamientos de engranaje).

El propósito del filtro pasa banda, es eliminar las bajas frecuencias generadas por las señales de alta energía rotacionales, debidas a desbalanceo, desalineación, flojedades, etc. Y amplificar solamente las señales de alta frecuencia, armónicas de defectos de rodamientos (estas armónicas ocurren a 5 – 40X frec. de defecto).

Excluyendo las bajas frecuencias, donde las componentes de gran amplitud tienen mucha significación respecto de la relación de ruido, permite que armónicas de defectos muy pequeñas puedan ser detectadas, sumadas, y convertidas por el proceso de envolvente, en su frecuencia fundamental del defecto y sus armónicas asociadas. El resultado es un espectro que presenta las señales repetitivas de rodamientos, y suprime todas las señales de baja frecuencia y/o no repetitivas.

Es importante recordar que el espectro de envolvente presenta señales, cuyas amplitudes son sumas relativas de la energía, en una banda filtrada en un rango específico. No se puede comparar el resultado de envolvente con una medición estándar de aceleración. Estas amplitudes relativas dependen de variables operacionales, tales como la ubicación del sensor y la velocidad del eje. Si estas variables operacionales permanecen constantes, y la

misma banda de filtro es usada en el tiempo, habrá una tendencia en la señal de la envolvente de aceleración. La señal es proporcional al defecto. En el diagrama temporal, el incremento de la amplitud se debe al aumento de defecto.

#### 9.6.4 Tabla de severidad de envolvente

SEVERIDAD (gE)		Diámetro del eje (mm) / velocidad (rpm)		
F <sub>max</sub>		200 a 500 mm	50 a 300 mm	20 a 150 mm
500 Hz	1000Hz	<500 rpm	500 a 1800 rpm	1800 a 3600 rpm
0.075	0.1	BUENO	BUENO	BUENO
0.35	0.5	SATISFACTORIO	SATISFACTORIO	SATISFACTORIO
0.55	0.75			
0.75	1	ALERTA	ALERTA	ALERTA
1.5	2	NO ADMISIBLE	NO ADMISIBLE	NO ADMISIBLE
3.5	4			
7.5	10			

Tabla 9-2: Tabla De Severidad.

Esta tabla provee una recomendación general sobre los valores gE, creada a partir de datos estadísticos aportados por un gran número de máquinas (ver tabla. 9-2). No obstante, los casos especiales deben ser analizados en forma particular.

Se asume que:

Sensor = CMSS 793, CMS 797, MCD, CMSS 2100, o CMSS 2200

Equipo = CMVA55 o CMVA320 o MCD

Filtro = N° 3 (30 a 500 Hz)

Fmax = 100 Hz

Detención = pico – pico

**Nota:** se debe tomar la medición para condiciones operativas normales (temperatura, caudal, potencia, presión, etc.). Montar el sensor en el punto más cercano posible a la zona de carga del cojinete.

#### 9.6.5 SEE technology (espectro de emisión de energía)

SEE es la sigla de Spectral Emitted Eenergy. La tecnología SEE provee una detención muy temprana de fallas de rodamientos y engranajes, por medio de la medición de la emisión acústica, de muy alta frecuencia. A través de la detección temprana del deterioro mecánico, la medición SEE también detecta problemas de lubricación de rodamientos causados por

contaminación, lubricación inadecuada, o la rotura de la película del lubricante por defecto local. Estas mediciones producen un valor numérico global, y un espectro FFT.

Es generalmente aceptado que una lubricación inadecuada es la causa primaria de una falla de rodamiento.

Operando en el rango de muy alta frecuencia, las mediciones de SEE detectan la tensión estructural iniciada por problemas de lubricación y por el contacto entre superficies del rodamiento. La indicación temprana de lubricación inadecuada provee al analista, tiempo de aplicar acciones correctivas de lubricación, prolongando la vida en servicio del rodamiento.

**Nota:** tal como la medición de envolvente de aceleración, la medición SEE debe ser realizada en la zona de carga del cojinete, o lo más cercano a ella.

El sensor SEE, no se apoya directamente sobre la superficie de la maquina. Por ello se usa un film de grasa o aceite entre el sensor y la superficie, para ayudar a la conductibilidad acústica entre ambos. La consistencia en la adquisición de datos es crítica. Los sensores permanentemente montados, son preferibles, dado que estos aseguran la misma ubicación y presión, como asimismo un acoplamiento fluido. Una lectura mayor de lo normal en SEE sugiere una lubricación insuficiente, contaminación del fluido, o el comienzo del defecto en el rodamiento. Si una lectura alta de SEE, se reduce a su valor normal luego de la relubricación, se deduce que esta es la causa, resolviéndose así el problema del rodamiento, con solo una lubricación, correctiva temprana. Si la lubricación es aplicada y la lectura global SEE permanece elevada, implica deterioro en el cojinete. En etapas posteriores, múltiples picaduras, aparecerán en la región de las pistas, y las lecturas SEE pueden decrecer. Esto se debe al efecto de la cuña de lubricante, que separa la superficie dañada, del contacto de las bolillas. El daño continúa y aparece la fatiga en la pista, con desprendimiento de partículas largas de acero, que comienza a contaminar el lubricante, aumentando considerablemente la lectura SEE.

### 9.6.6 SEE análisis numérico

Dependiendo del instrumento de monitoreo, SEE provee un número, un espectro o ambos.

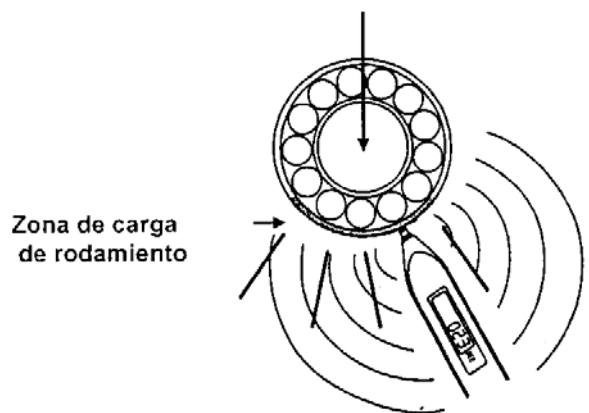


Fig. 9-44: SEE Análisis numérico.

Debido a que la señal SEE detecta una anomalía en la proximidad del sensor, es esencial un conocimiento claro de la máquina (ver Fig. 9-44). Por ejemplo, si una caja de engranajes es adyacente al rodamiento donde la SEE es tomada, las emisiones acústicas provenientes de la caja pueden sumarse a la del cojinete. En este caso una lectura alta de SEE, puede ser normal para un buen estado del rodamiento (debido a que la SEE adicional provenía de la caja).

En general, una medición SEE más elevada que lo normal, indica un problema. Si inicialmente no había señal SEE presente, utilizar la siguiente carta como guía para evaluar la severidad:

Los números están en medición SEE.

- 0 – 3 No identifica problemas.
- 3 – 20 problema de lubricación, contaminación, defecto de rodamiento con poca Carga, o pequeña avería con carga normal.
- 20 - 100 defecto de rodamiento o contaminación del lubricante.
- > 100 problema severo de rodamiento.

Nuevamente se recomienda el uso esta carta solamente como guía. La experiencia en las tendencias de las mediciones determinará el camino válido.

### **9.6.7 SEE análisis de espectros**

#### **Análisis espectral SEE**

Los defectos microscópicos incipientes de los cojinetes, no son visibles en los espectros normales de velocidad o aceleración porque no existe vibración aún, o:

- Si la vibración existe, ella ocurre en el rango de defecto del rodamiento, que el espectro FFT puede no mostrar.
- Esta es una amplitud pequeña que queda oculta por la vibración de la frecuencia rotacional.

La medición SEE monitorea la frecuencia ultrasónica en que ocurre esta emisión (150 – 500 kHz) y filtra todos los eventos rotacionales. Las señales acústicas provenientes de defectos de rodamiento incipientes son resaltadas y mostradas como picos a la frecuencia de defecto. En una medición de rodamientos, si no aparece un pico en el espectro SEE, es porque no hay señal acústica generada por el mismo.

**Nota:** cuando no se observan picos de fallas de rodamientos en el espectro SEE, pero el valor global aumenta, es indicación que el problema es de cavitación o roce.

### **9.6.8 HFD (high frequency detection)**

El proceso de detección HFD (Detección en alta frecuencia) muestra un valor numérico para un rango vibratorio de alta frecuencia, que genera una señal de baja amplitud, debido a pequeñas imperfecciones en los elementos rodantes de los rodamientos. HFD provee una alerta temprana por problemas en rodamientos.

La medición HFD muestra un valor proporcional a la señal global con un filtro pasa banda. El filtro permite la detección de la frecuencia de resonancia del sensor, la cual es usada para amplificar la señal de bajo nivel, generado en el impacto sobre las fallas. La resonancia del sensor esta en el orden de los 25 kHz y la medición del valor global en el rango comprendido por 5 kHz y 40 kHz. Las lecturas son realizadas utilizando un acelerómetro, y son registradas en Gs (RPM o 0 – pico).

Las mediciones HFD son realizadas periódicamente con el colector de datos portátil o con adquisición de datos en línea (on line). A medida que el programa de HFD se desarrolla, los datos medidos determinan los valores normales y los valores de alarma para el equipo específico. También, los valores de HFD pueden ser representados en el gráfico de tendencias, para detectar fácilmente cambios relativos en amplitud.

De manera distintas al metodo de envolventes, el proceso de la señal HFD, no indica cual es la falla (en caso de rodamiento, por ejemplo, si es la pista exterior, interior, bolas, etc.)

Sin embargo, provee una indicación numérica de la energía del valor global dentro de una banda de alta frecuencia, que es muy útil para la detección por tendencia de fallas de rodamientos.

**Nota:** las lecturas de HFD también son afectadas por roce de ellos, contacto de metal con metal y cavitación.

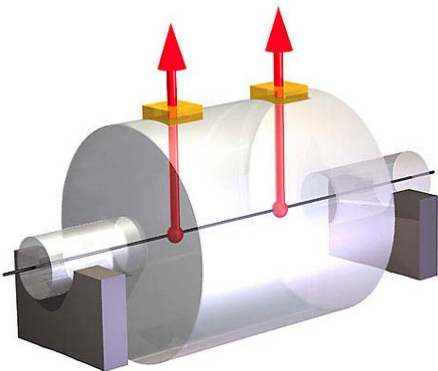
## **9.7 Análisis de problemas comunes**

### **9.7.1 Desbalance**

La experiencia indica que aproximadamente la mitad de los problemas de las máquinas se deben a desbalance.

El desbalance ocurre cuando el eje central de masa no coincide con la línea central geométrica. Hay tres tipos de desbalances: estático, cupla y dinámico, que es la combinación de los dos primeros.

#### **Desbalance estático**

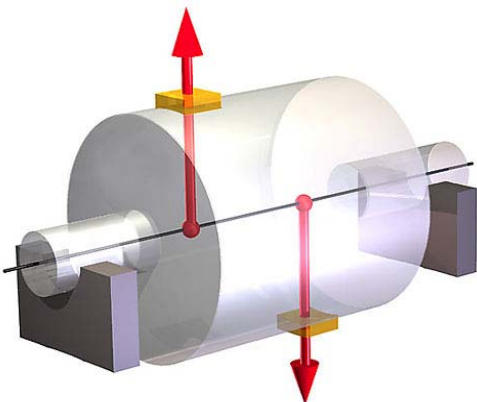


**Fig. 9-45: Desbalance estático.**



El desbalance estático (Fig. 9-45), solamente se considera una fuerza. Para observarla, se coloca el rotor en un soporte antifricción. El rotor girara hasta que la zona pesada quede abajo (6 horas). El termino estático implica que este tipo de desbalance, puede observarse en reposo.

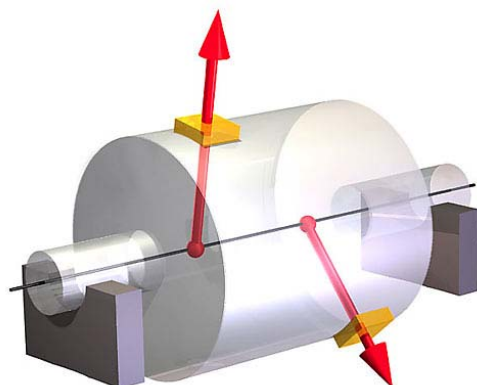
**Desbalance en cupla**



**Fig. 9-46: Desbalance en cupla.**

A diferencia del desbalance estático, el desbalance en cupla no puede medirse en reposo. En éste, dos fuerzas (pesos) iguales, están dispuestos a 180° (Fig. 9-46) entre sí lo cual implica que el rotor permanezca balanceado en reposo. Sin embargo, cuando el rotor gira, estas fuerzas mueven el rotor en dirección opuesta, en sus respectivos extremos del eje. Esto causara que el eje se mueva, con una diferencia de fase de 180° entre ambos extremos.

**Desbalance dinámico**



**Fig. 9-47: Desbalance dinámico.**

En realidad, todos los desbalances son dinámicos. Se llama así a la combinación del desbalance estático y en cupla (Fig. 9-47). En máquinas simples (un plano), es usual

detectar un desbalance estático más que dinámico (poleas, ventiladores, etc.). En máquinas más complejas, con rotores con varios planos, el desbalance en cupla es el importante.

Cuando se monta una máquina, en muchos casos es conveniente verificar primero el desbalance estático sobre apoyos, por seguridad, y luego realizar el balance de la cupla en todos los planos.

### **9.7.2 Desbalance causa y efecto**

La vibración causada por un desbalance puro, es una onda senoidal con un periodo de 1X revolución (Fig. 9-48). En el espectro FFT, esta aparece como una vibración más elevada en 1X, otras fallas también pueden ocasionar una mayor amplitud en 1X. Si el desbalance es muy severo, o cuando la rigidez horizontal difiere mucho de la vertical, suelen aparecer armónicas. Si alguna de estas es mayor que la fundamental, no debe sospecharse de un desbalance.

#### **Causas de desbalance**

El desbalance puede ser causado por un número de factores, incluyendo fabricación inadecuada, con el caso de piezas mal fundidas, depósito de materiales extraños en alabes, rotores, paletas, etc., o a la colocación de pesos en una reparación, sin el debido balanceo. En bombas, un desgaste desigual de impulsores genera desbalanceo.

#### **Efectos del desbalance**

El desbalance normalmente provocara que el cojinete soporte una carga dinámica más elevada que la especificada en diseño, que inducirá fallas por fatiga en el cojinete. La fatiga es el resultado de esfuerzos cíclicos aplicados sobre la superficie que soporta la carga, y metalográficamente, se observa como un desprendimiento de la superficie del metal.

### 9.7.3 Desbalance – diagnóstico

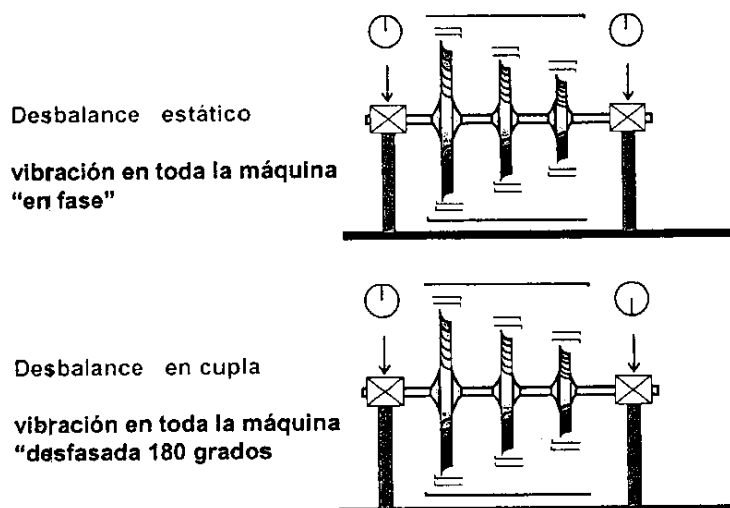


Fig. 9-48: Diagnóstico de desbalance.

#### Diagnóstico

##### Es probable un desbalance si:

- ☞ La medición de vibración global tiene alta energía, baja frecuencia, vibración radial (en máquinas horizontales, la amplitud se incrementa más en el sentido horizontal que en el vertical).
- ☞ Las mediciones espectrales tienen una amplitud en 1x r.p.m., más alto que lo normal.
- ☞ Las mediciones espectrales con 1X elevada, las armónicas (2X, 3X, 4X, etc.) son bajas o no existen.
- ☞ Las mediciones espectrales la amplitud 1X se incrementa con el aumento de la velocidad (luego de pasar por la velocidad crítica)
- ☞ La medición de fase para el desbalance en que predomina el estático, es normal el mismo ángulo en los dos cojinetes extremos de la máquina y luego del acoplamiento.
- ☞ En la medición de fase el sensor mostrará 90° de diferencia de fase entre la posición horizontal y vertical en el mismo cojinete.

**Nota:** todas las lecturas de fase pueden variar más o menos 30° debido a variaciones mecánicas

**Es probable que no sea desbalance si: (para máquinas horizontales)**

- ☞ Un incremento pequeño en velocidad produce un incremento radical en amplitud (chequear por resonancia).
- ☞ Las amplitudes verticales se incrementan mucho más que las horizontales (chequear por flojidades).
- ☞ Mediciones axiales son mayores que las radiales (chequear por desalineación)
- ☞ Si las armónicas de las r.p.m en 2X y 3X se incrementa con la velocidad (chequear por problemas de alineación, flojedad en cojinete, eje torcido, etc.)

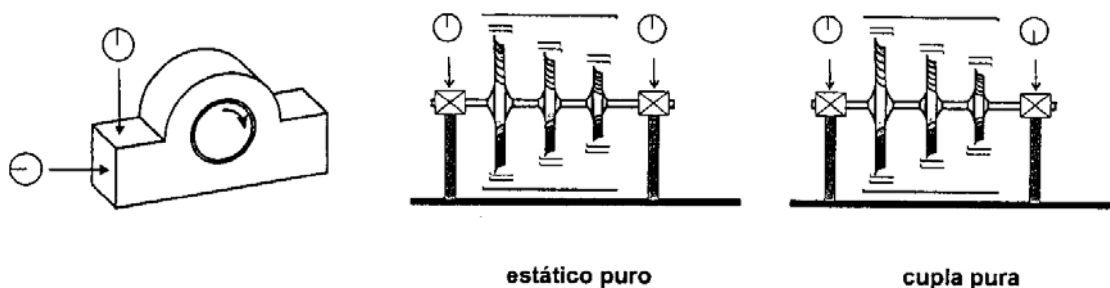


Fig. 9-49: Desbalance.

**Resumen**

- ☞ Si la medición radial 1X es elevada, y todas las armónicas son menores del 15% de 1X y no aumentan con la velocidad, entonces puede ser desbalance.
- ☞ Si la principal vibración en el plano radial, la amplitud es 1X es mediana o alta, la lectura de fase en el mismo cojinete, en sentido horizontal difiere 90° del sentido vertical, es posible un desbalance.
- ☞ Si la vibración no es sincrónica con 1X es probable un desbalance de una máquina próxima.
- ☞ Si la vibración se incrementa en los sentidos radial y axial, la máquina tiene un peso en voladizo, el ángulo de fase axial a través de la máquina y del acoplamiento es el mismo, puede ser un desbalance.

Es importante resaltar que un incremento en las fuerzas por desbalance, incrementa la carga del cojinete. Si la carga es excedida, la vida del rodamiento se reduce drásticamente.

### 9.7.4 Desalineación

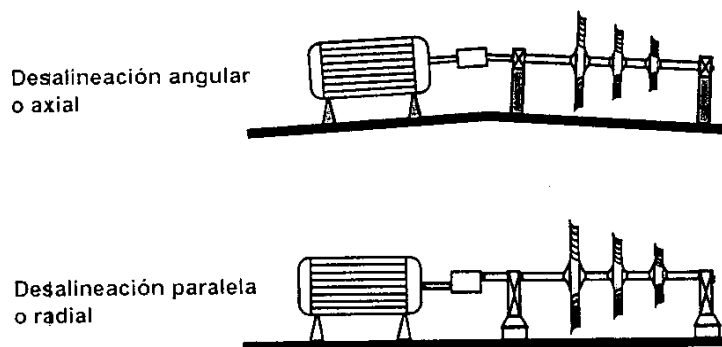


Fig. 9-50: Desalineación.

#### Revisión

La experiencia indica que junto al desbalance, la desalineación es la causa más común de los problemas de las máquinas.

La desalineación es causada cuando los ejes, acoplamiento y cojinete no son propiamente alineados a lo largo de su línea central.

Los tipos de desalineación pueden ser: angular y paralela. En la práctica, generalmente se presentan las dos (Fig. 9-50).

#### Desalineación angular

La desalineación angular ocurre cuando los ejes son unidos alabeados entre sí, de tal manera que se induce una fuerza que tiende a doblar los ejes.

#### Desalineación paralela

La desalineación paralela ocurre cuando las líneas centrales de los ejes son paralelas, pero desplazadas una de otra.

**Nota:** ambas deben medirse en planos horizontal y vertical.

### 9.7.5 Desalineación – causa y efectos

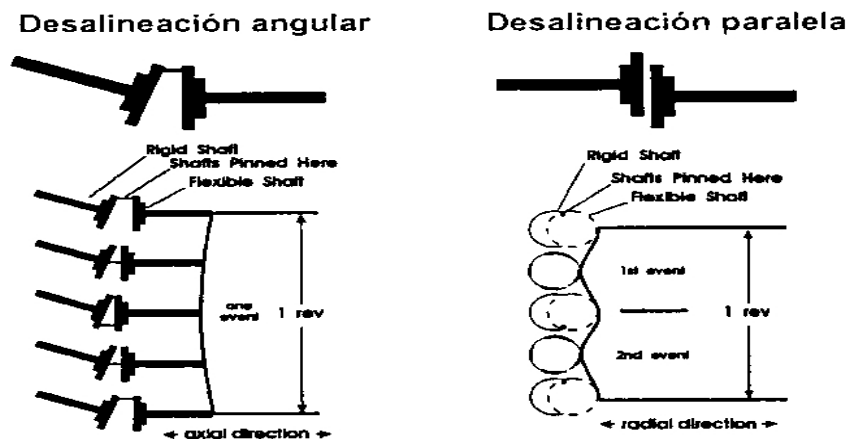


Fig. 9-51: Tipos de Desalineación.

Una desalineación angular pura, causa una vibración axial a la frecuencia de rotación (1X)

Una desalineación radial pura, produce una vibración radial a dos veces las r.p.m (2X)

Una desalineación excesiva, u otras fallas, además producen vibraciones en 3X

Debido a que normalmente la desalineación es una combinación de angular a radial, las frecuencias 1X y 2X son analizadas en las mediciones radiales y axiales.

También, mientras las fuerzas de desbalanceo (rotacionales) son iguales en las posiciones vertical y horizontal, las desalineaciones (estáticas) raramente son iguales.

#### Causas de desalineación

Las posibles causas de la desalineación son:

- ☞ Expansión térmica debido a trabajos con calor (como en las turbinas). Muchas máquinas son controladas en frío y luego cuando se operan con temperatura, la dilatación térmica causa desalineación.
- ☞ Máquinas de acople directo, no alineadas adecuadamente.
- ☞ Fuerzas transmitida a la máquina por cañerías o falta de soportes.
- ☞ Fundaciones desniveladas, con bases flojas o con base dispareja.

### **Efecto de la desalineación**

La desalineación usualmente produce un aumento de carga en los cojinetes más alta que la especificada, lo cual provocara la rotura del mismo por fatiga. Esta se produce en la zona de carga del rodamiento, y genera el agrietamiento de la superficie del metal. También, en los motores eléctricos una carga excesiva produce una operación con baja eficiencia (aumenta el consumo eléctrico).

### **9.7.6 Desalineación - diagnóstico**

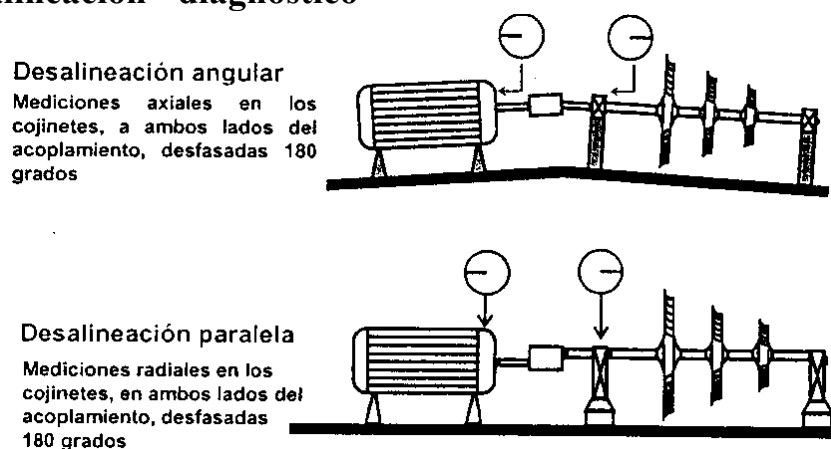


Fig. 9-52: Tipos desfase de las desalineaciones.

### **Diagnóstico**

- ☞ Medición de valor global – las fuerza de desbalanceo son iguales a los planos horizontales y vertical en cambio de las desalineaciones no son así. Debido a la gravedad y a la rigidez del montaje, el desbalanceo típicamente produce vibraciones mayores en el plano horizontal, es sospechada una desalineación antes que un desbalanceo
- ☞ Medición del valor global – la amplitud de las vibraciones en el plano horizontal se incrementa 2 o 3 veces.
- ☞ Medición del valor global – esta es de alta energía, baja frecuencia, vibraciones radiales y axiales (la desalineación típicamente presenta una valor axial alto respecto al radial).
- ☞ Mediciones espectrales – amplitudes más altas que lo normal en 1x, 2x, 3x en sentidos radiales y axiales. La amplitud 2X no siempre está presente, pero si esta puede variar desde un 30% de 1X hasta 10% - 200% de 1X.

**Nota:** mediciones de amplitudes de  $2X < 50\%$  de  $1X$  son usualmente aceptables y pueden operar por un largo periodo de tiempo. Cuando  $2X$  está entre  $50\%$  a  $150\%$  de  $1X$ , es probable que ocurra un daño en el acoplamiento. La máquina con  $2x$  mayor de  $150\%$  de  $1X$  tiene una severa desalineación, y el problema debe ser corregido lo antes posible.

- ☞ Medición espectral – cuando hay una severa desalineación, el espectro puede contener armónicas de  $3X$  a  $10X$ .
- ☞ Medición de fase – desalineación angular. En la posición axial, la fase difiere  $180^\circ$  a través del acople.
- ☞ Medición de fase – desalineación paralela. En la posición radial, hay una diferencia de fase de  $180^\circ$  a través del acoplamiento. Una diferencia de  $0^\circ$  o  $180^\circ$  puede ocurrir si el sensor se mueve desde el plano horizontal al vertical, en el mismo cojinete
- ☞ Medición de fase – combinación de desalineación angular o paralela. En posición radial y axial, hay una diferencia de fase de  $180^\circ$  a través del acoplamiento.

### **9.7.7 Desalineación - resumen**

Es claro que la medición de fase provee de una información importante para el diagnóstico de la desalineación. Si es posible, se debe realizar la comparación de fase entre la lectura axial del cojinete en los extremos opuestos a través del acoplamiento.

**Nota:** la medición axial a través del acoplamiento debe realizarse en la misma posición axial en ambos cojinetes.

#### **Probablemente no sea desalineación si:**

- Las mediciones de amplitud axial son bajas (controlar flojedades)
- Las amplitudes de las armónicas  $4X - 10X$  son altas, o si  $\frac{1}{2}$  armónica está presente (chequear flojedades).

#### **Resumen**

- Si hay amplitud anormal en  $1X/2X$ .
- Si hay  $180^\circ$  de diferencia de fase a través del acoplamiento.



- Si hay acoplamiento o correa, puede ser desalineación.
- También habrá si la amplitud radial 2X es anormalmente alta y esta 180° fuera de fase a través del acoplamiento.
- Si la componente axial 1X es anormalmente alta y esta 180° a través del acoplamiento.

### 9.7.8 Eje torcido

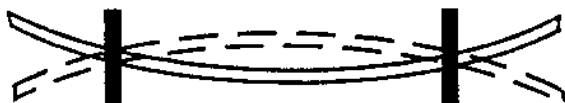


Fig. 9-53: Eje torcido.



### Revisión

La vibración global y el análisis espectral, presentan un problema de eje doblado idéntico a un problema de desalineación. La medición de fase a lo largo del eje permite distinguir las dos.

### Causas de dobladuras de ejes

- ☞ Doblado por deformación térmica – como resultado de la gravedad, los ejes largos respecto de su sección, pueden curvarse en reposo (Fig. 9-53).
- ☞ Manipuleo inadecuado en el transporte.
- ☞ Torque elevado.

Efectos del eje doblado.

Como en el desbalanceo, el eje doblado usualmente causa rotura por fatiga en los cojinetes, por la carga dinámica elevada.

**Nota:** distorsiones en carcasas, especialmente en motores largos, pueden presentar los mismos síntomas que ejes doblados.

### 9.7.9 Eje Torcido - diagnósticos

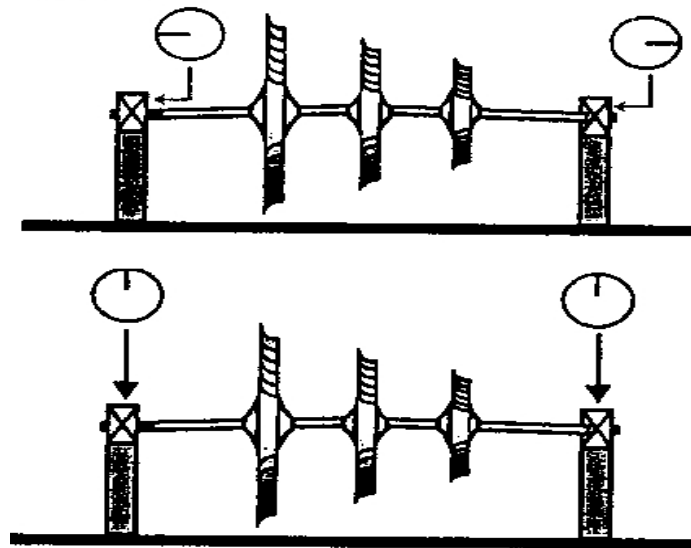


Fig. 9-54: Diagnóstico Eje Torcido.

#### Diagnósticos

Un eje doblado como el de la Fig. 9-54, típicamente presenta las mismas características que la desalineación.

**Nota:** los síntomas de fase del eje doblado aparecen a lo largo del eje estando desacoplado. La desalineación ocurre con los ejes acoplados.

La medición de fase es esencial para el diagnóstico de eje doblado.

**Nota:** todos los valores de fase son más o menos 30°. La medición de fase a través de la máquina debe realizarse en la misma posición en ambos cojinetes.

**Es probable que el eje este doblado si:**

- Esta desacoplado y además:
- El valor global y espectro – similar a la desalineación.
- La medición de fase- en la posición axial: 180° de diferencia de fase.
- La medición de fase – en la posición radial: no hay diferencia de fase entre los cojinetes en los extremos del eje.

**Revisión**

- El plano primario de vibración es el sentido axial, dominante en 1X, no se presenta una cupla, hay una diferencia de 180° en sentido axial y no hay diferencia de fase en sentido radial. Estas características corresponden a síntomas de eje doblado.

**9.7.10 Flojedades mecánicas**

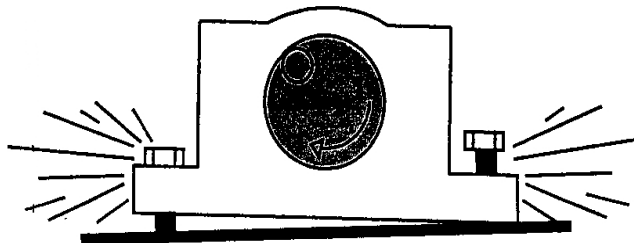


Fig. 9-55: Flojedad Mecánica.

**Revisión**

Flojedades mecánicas (Fig.9-55), o el montaje incorrecto entre componentes, es caracterizado generalmente en el espectro por una larga sucesión de armónicas de las r.p.m. o ½ de las r.p.m., con amplitudes anormalmente elevadas.

**Nota:** estas armónicas pueden ser esporádicas. Por ejemplo, las flojedades pueden mostrar picos en 2X, 3X, 4X, 5X, 6X, etc., o a 3X, 3.5X, 4X, 5.5X, 6X, etc.

**Causas de flojedades mecánicas**

Las causas posibles de huelgos/flojedades son:

- Que la máquina tenga su montaje flojo.
- Que un componente de la máquina este flojo.
- El rodamiento ha desarrollado una avería que rompió sus elementos, o agrando el alojamiento del cojinete.

#### **Efectos de flojedades mecánicas**

- Si la flojedad es debida al cojinete, el efecto es el mismo que el desbalanceo, o más severo.
- Si la flojedad se debe a un componente (por ejemplo un aspa de un ventilador), es posible un daño secundario por la rotura de la aspa.

### **9.7.11 Flojedades mecánicas diagnóstico**

#### **Diagnóstico**

##### **Es probable una flojedad mecánica si:**

- Medición global – posee una alta energía vibratoria radial, especialmente en el plano vertical.
- Medición global – en el plano axial las vibraciones son bajas.
- Medición espectral – hay una amplitud en frecuencia de rotación anormal, seguida por armónicas altas, posiblemente  $\frac{1}{2}$  de las r.p.m. también (de 2X a 10X). los picos de las armónicas decrecen en amplitud a medida que crece la frecuencia (excepto a 2X, en el plano vertical puede ser mayor).

#### **Revisión**

- Si hay una serie de tres o más múltiplos sincrónicos o  $\frac{1}{2}$  de r.p.m.(en el rango 2X a 10X), y su magnitud es mayor de 20% de 1x, pueden ser flojedades.
- Si la máquina es de acoplamiento rígido (sin acople flexible o correa) y la componente radial 2x es alta, también es síntoma de flojedades.

## 9.7.12 Cojinetes desalineados

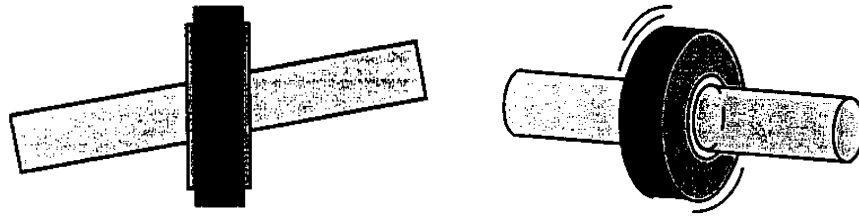


Fig. 9-56: cojinetes desalineados.

Al igual que la desalineación de ejes, la de cojinetes usualmente genera vibraciones elevadas en sentido axial. Sin embargo, la medición de fase es diferente.

Si la lectura de fase en los cuatro puntos adyacentes varía considerablemente, es probable una desalineación de cojinetes.

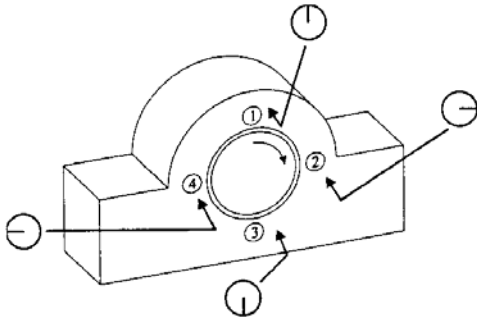
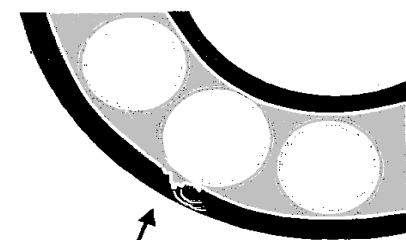


Fig. 9-57: lectura de fase en cojinetes.

## 9.8 Monitoreo de rodamientos

### 9.8.1 Falla en los rodamientos



Impronta en pista exterior

Lubricación inadecuada

- Excesiva
- Insuficiente
- Contaminada

Carga excesiva causada por:

- Desalineación
- Desbalanceo
- Eje torcido
- Excentricidad, etc.

Incorrecta manipulación o montaje.  
Tiempo.

Fig. 9-58: Daño en pista interna de un rodamiento.

Un rodamiento puede fallar por un número de razones tales como: lubricación inadecuada, contaminación del lubricante, carga elevada por problemas de la máquina (desbalanceo, desalineación, eje doblado, etc.), mal manipuleo o montaje inadecuado, vejez (fatiga superficial), etc.

En general, el resultado inicial de la fatiga generada por las cargas cíclicas, son fallas que aparecen inmediatamente debajo de la zona de rodadura con carga (Fig. 9-58). Luego de un tiempo, este esfuerzo provoca picaduras que gradualmente se extiende sobre la superficie. Al pasar los elementos rotantes sobre la falla, se fragmenta nuevamente. Esto es conocido como spalling o flaking. El spalling se incrementa progresivamente hasta inutilizar el rodamiento. Esta tipo de daño de rodamiento es de una progresión lenta, y se desarrolla en cuatro etapas de fallas.

Otro tipo de falla es iniciado por fatiga de la superficie. Se forman cráteres en la superficie y penetran en el material. Esta fatiga es también causada por la carga excesiva o la lubricación inadecuada. En ambos casos, la falla del rodamiento produce ruido y vibración, permitiendo su detención y análisis anticipado. Esto provee al personal de mantenimiento, de tiempo suficiente para corregir la causa del problema del rodamiento (extendiendo efectivamente la vida en servicio), o si es necesario, tiempo para reemplazar el rodamiento antes que falle completamente.

Una vez reemplazado el rodamiento, el analista debe determinar la causa raíz del problema. Muchas veces, problemas en las máquinas tales como desbalanceo, desalineación, mala lubricación, etc., son las causas de las fallas de rodamientos. Para prevenir estas nuevamente, se debe corregir la causa raíz.

### 9.8.2 Curva típica de falla de rodamientos

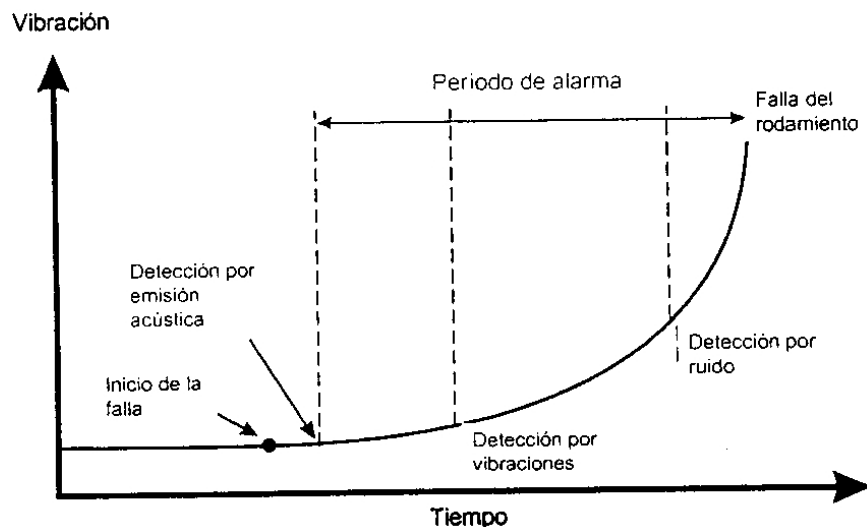


Fig. 9-59: Curva de falla de los rodamientos.

Muchos rodamientos continúan operando con pequeñas fallas. En el transcurso del tiempo, estas comienzan a incrementarse y progresan rápidamente llegando a roturas catastróficas.

Cuando el rodamiento comienza a demostrar una tendencia de falla, la adquisición de datos debe incrementarse para aumentar la confiabilidad de la máquina.

El objetivo del sistema de mantenimiento predictivo, es la detención temprana de las anomalías, para permitir una programación de la tarea correctiva (Fig. 9-59).

### 9.8.3 Frecuencias de fallas de rodamientos

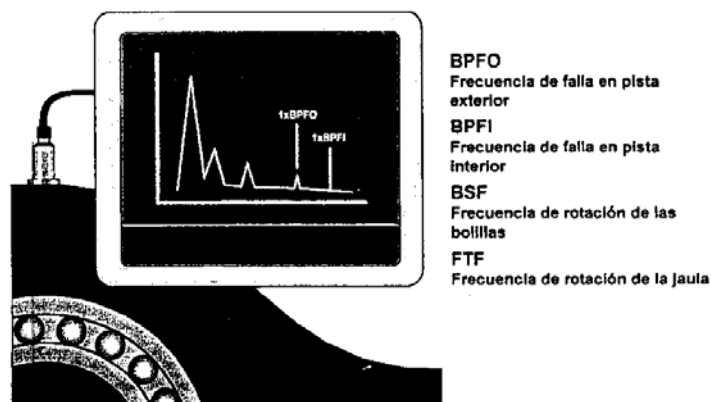


Fig. 9-60: Frecuencias de falla de los rodamientos.

Existe una relación física entre la geometría de los rodamientos, y la señal de vibraciones emitida por los defectos de cada componente del rodamiento. Si se conocen las dimensiones geométricas de los rodamientos (diámetro de las bolas, diámetro medio, número de bolas, y ángulo de contacto), podemos calcular las frecuencias de falla de cada componente (Fig. 9-60). Luego que las frecuencias de fallas del rodamiento son conocidas, se puede perfectamente analizar el espectro para identificar los picos de esas frecuencias (o sus armónicas). Un pico en la frecuencia de falla, indica que el rodamiento tiene problema, y además cual es la ubicación del mismo en el rodamiento.

Las frecuencias de fallas de rodamiento se calculan individualmente para cada rodamiento:

Pista exterior: outer race = BPFO (Ball Pass Frequency Outer Race)  
Pista interior: inner race = BRFI (Ball Pass Frequency Inner Race)  
Canasto: cage = FTF (Cage Frequency, or Fundamental Train Frequency)  
Bolas: rolling elements = BSF (Ball Spin Frequency)

Estas cuatro frecuencias de defectos son calculadas para cada tipo de rodamientos, usando ecuaciones relativas a su geometría. Por ejemplo, la ecuación para calcular BPFO es:

$$\text{BPFO} = (n)/2 \times (\text{r.p.m.})/60 \times (1 - \text{Bd}/\text{Pd} \times \cos A)$$

Donde:

n = número de bolas  
Bd = diámetro de bola  
Pd = diámetro primitivo  
A = ángulo de contacto

### 9.8.4 Espectro de frecuencias de fallas

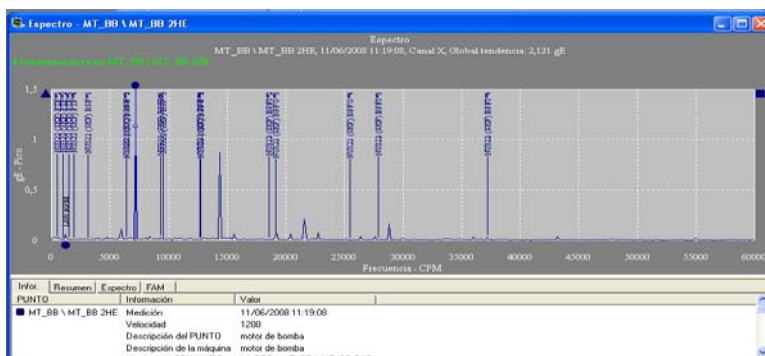


Fig. 9-61: Espectro de frecuencia de fallos.



Si se conoce la geometría específica de cada uno de los rodamientos, esto es, el diámetro de las bolas, el diámetro medio, el número de bolas y el ángulo de contacto, se puede realizar el cálculo de las frecuencias de fallas usando una calculadora estándar. Pero con más de 1000 rodamientos en uso en una simple máquina de papel consume mucho tiempo. Además de ser un trabajo tedioso. Gracias al avance tecnológico, la computadora puede determinar dichas frecuencias

La mayoría de software de análisis incorpora bases de datos de rodamientos identificados por fabricantes y número de modelos (Fig. 9-61). Cada uno de los cuatro defectos es almacenado en la base. En la configuración del punto de medición, el usuario simplemente especifica el rodamiento (fabricante y modelo). El programa introduce las frecuencias de fallas en cada punto de medición seleccionado, para relacionarlas con las mediciones. Luego de la colección de datos, cuando se observan los espectros, con una simple selección en el menú, se puede apreciar superpuestas, las frecuencias de fallas. Esto hace muy fácil para identificar defectos de rodamiento. Nuevamente, el pico a la frecuencia de falla conocida indica que el rodamiento tiene problemas, e indica donde está el defecto.

**Nota:** en el espectro claramente se identifica el uso de la sobreposición de las frecuencias de fallas de rodamientos. El proceso de envolvente ha filtrado en el rango de frecuencia seleccionada, las vibraciones rotacionales con altas amplitudes, que ocultan los impulsos repetitivos de baja energía que producen las fallas de rodamientos. Luego, estos son sumados y expresados en el rango del defecto fundamental y sus armónicas. El resultado es un cuadro de un defecto de pista externa a la frecuencia BPFO del rodamiento.

### 9.8.5 Etapas de la avería

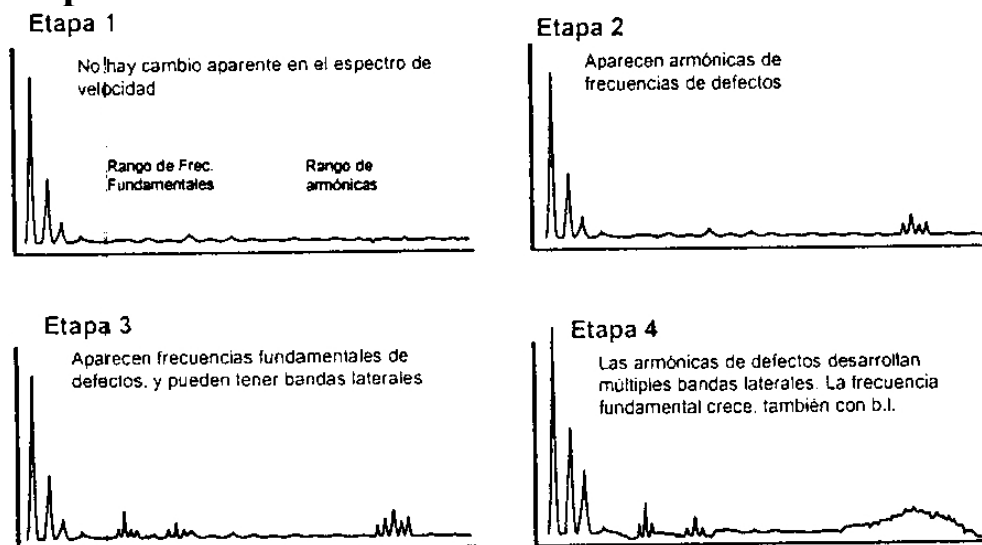


Fig. 9-62: Las 4 etapas de fallo de un rodamiento.

Normalmente, el defecto del rodamiento progresa a través de cuatro etapas antes de la falla catastrófica. Cada una de esa etapa exhibe características espectrales definidas (Fig. 9-62).

**Nota:** la aceleración y el procesamiento de la señal envolvente en aceleración, son los mejores parámetros para analizar problemas de rodamientos. El espectro mostrado arriba plotea velocidad, dado que en este se aprecian eventos de altas y bajas frecuencias.

**Etapa 1** – cuando en un elemento del rodamiento comienza un defecto, la señal del mismo es muy pequeña comparada con las otras emanadas de la máquina, y no es apreciable en el espectro de velocidad. El procesamiento de señales como SEE, envolvente de aceleración, Spike Energy, y HFD, que concentran el monitoreo en rangos de frecuencias muy altos, o ultrasónicos (donde aparecen primero los defectos de rodamiento), son necesarios para indicar defectos en etapas tempranas.

**Etapa 2** – a medida que el defecto crece, aparecen armónicas del defecto fundamental (en el rango de 500 Hz a 2kHz). en el espectro de velocidad, estas armónicas del defecto fundamental son los indicadores más tempranos de que el problema existe. Hacia el final de la etapa dos, aparecen bandas laterales en los picos armónicos.

**Etapa 3** – a medida que la falla aumenta, aparecen armónicas del defecto fundamental en el rango de frecuencias. Normalmente a mayor número de armónicas, más gravedad tiene el

problema. Cuando la falla es muy severa, además de las armónicas el rodamiento debe ser cambiado en este momento.

**Etapa 4** – con el progreso del defecto, aumentan las armónicas y sus bandas laterales, y aumenta el nivel del ruido. En esta etapa, crece la componente 1x r.p.m y sus múltiplos. Es importante resaltar que en la etapa cuatro, puede disminuir el valor global de la vibración (a pesar que el estado del rodamiento empeora). Esto es causado por la expansión de múltiples defectos en la pista, lo cual implica que los impactos severos disminuyen.

## 9.9 Tabla de análisis de fase

En la tabla 9-3 se presenta) una guía general para los casos mas comunes de problemas de máquinas.

**Nota:** siempre se debe tomar en cuenta el sentido del sensor cuando realice lecturas

Plano primario		Frecuencia Dominante	Relación de fase
<b>Desbalanceo</b>			
Masa	Radial	1X	90° cuando el sensor se mueve de la posición horizontal a la vertical
Masa Voladizo	Axial y radial	1X	Lectura axial en fase
Eje Torcido	Axial y radial	1X	180° de cambio en el sentido axial, radial en fase.
<b>Desalineación</b>			
Angular	Axial	1X, 2X	180° de diferencia en el sentido axial y entre ambos equipos.
Paralela	Radial	1X, 2X	180° de diferencia en el sentido radial, en ambos lados del acople. De vertical a horizontal, en el mismo cojinete mostrara de 0° a 180°
Combinada	Axial y radial	1X, 2X	Diferencia de 180° radial y axial a ambos lados del acople
<b>Flojedad Mecánica</b>			
estructural	Radial	1X	Cambio de fase de 180° entre la parte de la maquina, fundación, base.
Pata floja	Radial	1X, 2X	La fase cambia cuando se aprietan los bulones
Roce	Axial y radial	1X, 2X, ..., 10X	La fase es inestable entre una lectura y otra.

**Tabla 9-3: de análisis de fase.**

### **Desalineación**

Con una desalineación severa, el espectro puede contener múltiples armónicas desde 3X a 10X. si la amplitud de la vibración en el plano en el horizontal se incrementa 2 o 3 veces, es síntoma de desalineación.

### **Flojedades**

Las flojedades estructurales típicamente ocurren cuando la fundación de la máquina se degrada, perdiendo rigidez, lo cuál causa movimientos en la máquina.

“Soft Foot” es el resultado de flojedades en una pata de la máquina, respecto de la fundación.

Con solturas provocadas por desgastes o falta de ajustes, las amplitudes de la vibración pueden variar significativamente cuando se coloca el sensor en diferentes puntos del cojinete.

## **9.10 Ejemplo de diagnóstico analizando la fase**

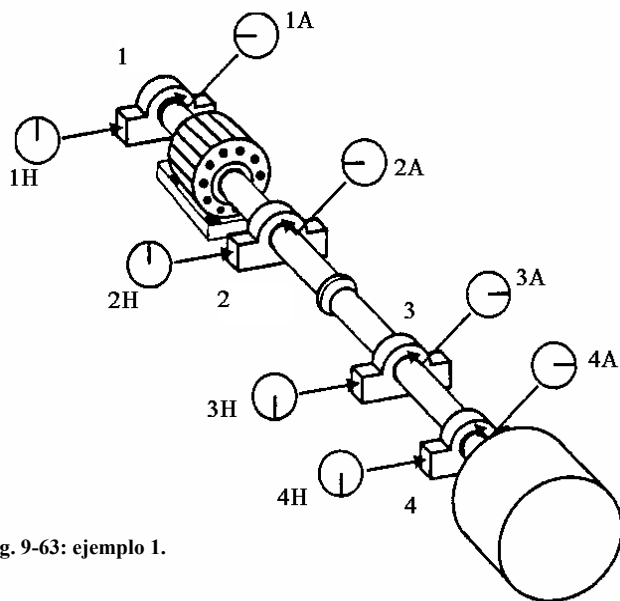


Fig. 9-63: ejemplo 1.

### **Ejemplo 1**

En el primer caso se tiene un espectro FFT del sistema mecánico mostrado en la Fig. 9-63, el cual muestra una componente 1X mayor de lo normal en los 4 cojinetes. Al considerar las mediciones de fase radiales y axiales resultantes en la figura, puede establecer la causa de la vibración excesiva.

**CAUSA:** Desalineación combinada. Esto se diagnostica debido al desfase de 180° que existe entre los puntos 2A y 3A y las mediciones en los puntos 2H y 3H.

## Ejemplo 2

El segundo caso un espectro FFT del sistema mecánico mostrado en la Fig. 9-64, muestra una componente 1X mayor de lo normal en los 4 cojinetes. Al considerar las mediciones de fase radiales y axiales resultantes en la figura, puede establecer la causa de la vibración excesiva.

**CAUSA:** Desbalance.

Debido a la vibración alta en 1X, al desfase de 90° entre las mediciones horizontal y vertical en la misma chumacera (1H y 1V), además se tiene un peso en voladizo y el ángulo de fase axial a través de toda la máquina y del acoplamiento es el mismo, se establece la causa de vibración excesiva por desbalance.

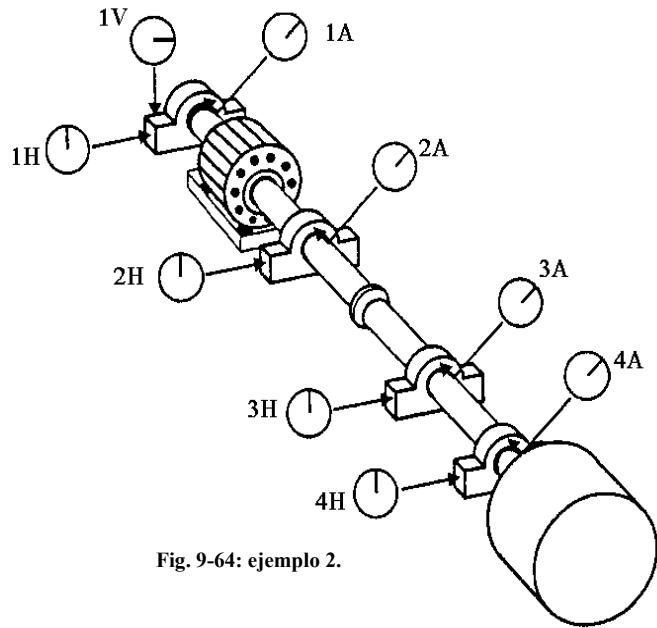


Fig. 9-64: ejemplo 2.

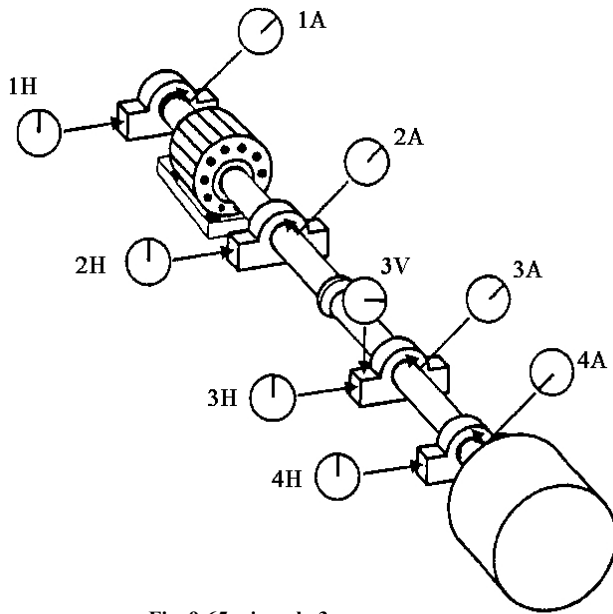


Fig. 9-65: ejemplo 3.

**CAUSA:** Eje Torcido

El valor global y espectro son similares a la desalineación. Las fases en la posición axial (3A y 4A) presentan un desfase de 180°, y entre los puntos radiales 3H y 4H no hay diferencia de fase. Todos estos aspectos indican un problema de eje torcido.

del acoplamiento es el mismo, se establece la causa de vibración excesiva por desbalance.

## Ejemplo 3

El tercer caso un espectro FFT del sistema mecánico mostrado en la Fig. 9-65, muestra una componente 1X mayor de lo normal en los 4 cojinetes. Al considerar las mediciones de fase radiales y axiales resultantes en la figura, puede establecer la causa de la vibración excesiva.

## 9.11 Órbitas

Las órbitas son patrones de las señales en el dominio de tiempo que se trazan simultáneamente en el plano coordinado X-Y de un osciloscopio o de un analizador de vibraciones. En esta forma de presentación, es muy difícil identificar el comienzo de la órbita pues aparece como un lazo sin fin. Para determinar la dirección de la rotación, se emplea un disparador de la fase. El disparador muestra la dirección de la rotación mirando el punto en la órbita como el punto de partida en 1X RPM y el espacio en blanco como el punto final.

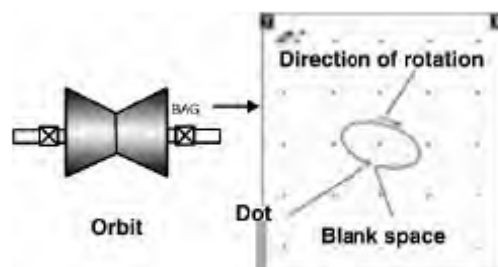


Fig. 9-66: Órbita polar.

El análisis de la órbita es la medición de la vibración de cualquier sistema rotativo en un diagrama X-Y (ver Fig. 9-66).

En la mayoría de las aplicaciones, la unidad de medida es el desplazamiento el cual se mide directamente usando puntas de prueba de la proximidad. Estos tipos de medidas son lecturas relativas de la vibración. Las lecturas relativas se consideran las medidas de vibración del eje con respecto al soporte del cojinete. Pues las puntas de prueba se afianzan con abrazadera firmemente a la cubierta, no hay movimiento relativo entre la punta de prueba y la cubierta. Así, se alcanza la órbita. Con eso en mente, los diagramas de la órbita dan un gráfico visual del movimiento real de la línea central de eje dentro del soporte del cojinete.

Los acelerómetros y los recolectores de velocidad se pueden también utilizar para crear órbitas. Como estos son transductores que requieren el montaje en el exterior del soporte del cojinete a estos tipos de medidas se llaman las órbitas de la cubierta.

Las órbitas de la cubierta son útiles para separar vibraciones del eje y la cubierta, esto puede proporcionar el movimiento absoluto del eje (concerniente a espacio).

Para entender órbitas, las formas de onda y su relación a las órbitas deben ser explicadas. El diagrama de la forma de onda demostrado en la Fig. 9-67 tiene dos ondas seno, Y y X. El diagrama de Y está arriba y el diagrama de X está en la parte inferior. Las señales de la forma de onda corren de izquierda a derecha y las amplitudes cambian de negativo al positivo, En cualquiera que fuese el caso. Los cambios en la forma de onda causan la órbita a formar.

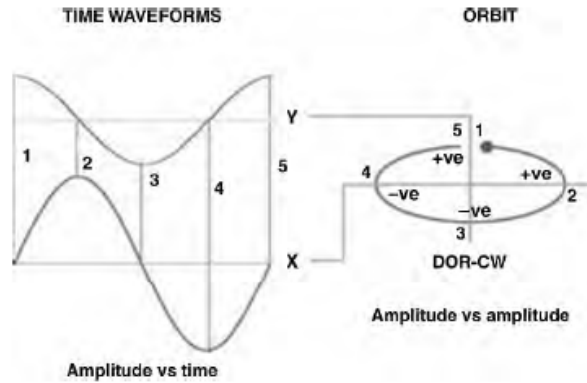


Fig. 9-67: Forma de onda y su relación con las orbitas.

Una orbita esta compuesta de un eje X e Y, y un cero en el centro. Inicia desde el centro, arriba es positivo y abajo es negativo. A la derecha es positivo y a la izquierda es negativo. Conociendo estas convenciones de la forma de onda y las orbitas se puede trazar una onda y crear una orbita.

Si se trazara la forma de onda Y, se podría observar en el punto 1 donde la amplitud es máxima, por decir una unidad de 25 micras y va a cero en el punto 2. Alcanza -25 micras en el punto 3, cero nuevamente en el punto 4 y finalmente 25 micras en el punto 5. Este ciclo continuo arriba y abajo. Si existiera este rastro solamente, describiría una línea recta a partir de +25 micrones a los micrones -25.

La forma de onda de X comienza con la amplitud cero en el punto 1, que sucede a 90° detrás Y. Aquí, la forma de onda de X viaja a través de los 5 puntos con la amplitud máxima de 50 micrones, por ejemplo.

La forma de onda de X solamente produciría una línea horizontal a partir de +50 micrones a los -50micrones. Ahora considerando ambas formas de onda como se mueven con el tiempo. Esta combinación de puntos de X y de Y en la órbita complementan la elipse.

Para visualizar la órbita, hay que observar en el diagrama y notar que la Y está en la amplitud máxima cuando X es cero. En el punto 1, la forma de onda de Y está en la amplitud máxima y la forma de onda de X es cero. Al trasladarnos al punto 2, que esta a 90° a la derecha, la órbita X está en la amplitud máxima en +50 micrones cuando Y es cero. En el punto 3, otra vez 90° a la derecha, la forma de onda de X es cero y la forma de onda de Y está en -25 micrones. En el punto 4, 90° más, se alcanza los -50 micrones de la forma de onda de X pero ahora la forma de onda de Y es cero. El punto 5 es igual que el punto 1.

La órbita cambiará como la amplitud y los ángulos de fase cambian en las formas de onda. Como se menciono con anterioridad, el punto en la órbita significa el comienzo de la onda y el espacio en blanco denota el extremo. En este ejemplo de una órbita, nos movimos de izquierda a derecha, puntos 1-5 y en el movimiento de la órbita en la dirección de las agujas del reloj, siguiendo la convención.

## **9.12 Diagrama de bode**

Un diagrama de bode comprende dos gráficas (ver Fig. 9-68):

- Amplitud vs. Velocidad de la máquina.
- Fase vs. Velocidad de la máquina.

Para exhibir un diagrama de Bode, un disparador de la fase se utiliza para obtener una referencia del eje para la medición de la fase y para medir la velocidad de la máquina.

El disparo y los registros de amplitud y fase son analizados simultáneamente a intervalos de velocidades específicas (Los cuales pueden ser definidos por el usuario) y las dos graficas son presentadas una sobre la otra.

En rotodinámica, el diagrama de Bode se utiliza principalmente para determinar la velocidad crítica del rotor. En el diagrama, se puede observar la velocidad en la cual amplitud de la vibración es máxima, y para la confirmar se chequea el gráfico de la fase para ver la diferencia desde el valor inicial por 90°.



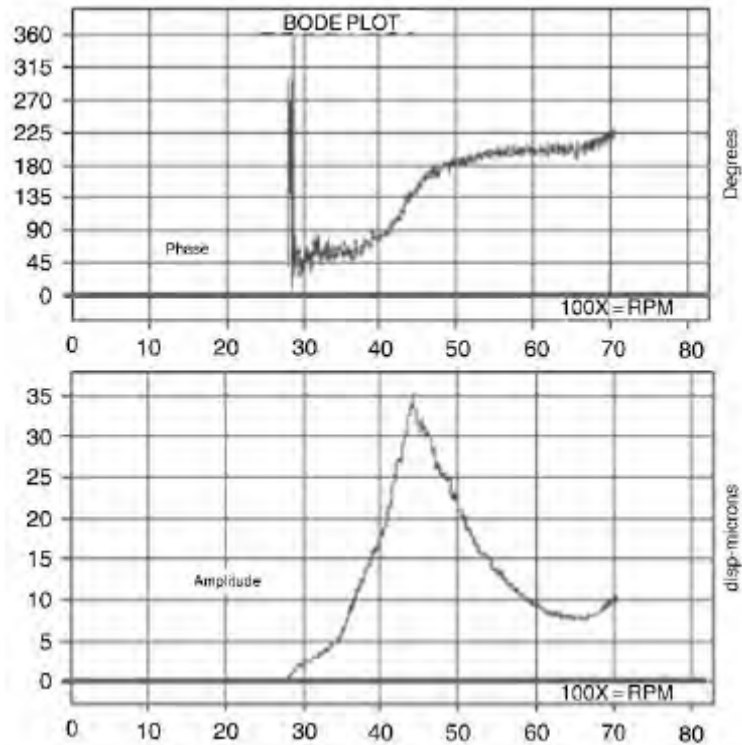


Fig. 9-68: El diagrama de bode muestra la velocidad crítica de un rotor a aproximadamente 4400rpm Note que ha esta velocidad la amplitud es máxima a 35 micrones. La fase, la cual a 2900rpm era de 45°, es 135° a 4400 rpm indicando una diferencia de 90°.

El diagrama de Bode se puede también utilizar para determinar la cantidad de desplazamiento asociada a una punta de prueba de proximidad, a la condición del balance, sistema de amortiguación y al ángulo de fase operacional y amplitud a varias velocidades de la máquina.

### 9.13 Diagramas polar/Nyquist

El diagrama polar o de Nyquist es también una representación de las mismas tres variables consideradas en un diagrama de Bode. Las variables se trazan en una sola carta circular en vez de los ejes cartesianos (Fig. 9-68).

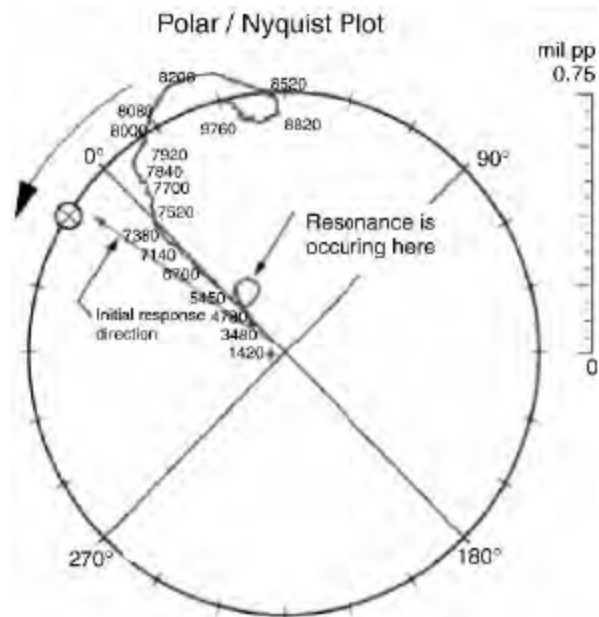


Fig. 9-69: Un diagrama de Nyquist indicando la velocidad crítica de un rotor (resonancia) a aproximadamente 5000rpm.

El centro del diagrama representa cero velocidad y cero amplitud con subsecuentes mediciones de amplitud y ángulo de fase trazada con su velocidad de máquina asociada (Fig. 9-69). Esto es como si se trazara el extremo del vector de vibración (ubicación del extremo del vector) cuando la velocidad de la máquina se incrementa hasta velocidad total.

Las medidas del ángulo de fase se trazan alrededor de la circunferencia de la carta, contraria a la dirección de la rotación de la máquina. Los diagramas polares se filtran siempre para máquinas trabajando a la velocidad o un cierto múltiplo de la velocidad de la máquina, dependiendo de la falla que esta siendo investigada.

Las velocidades críticas de la máquina se exhiben como lazos, con la velocidad crítica situada el 90° del comienzo del lazo. Esta característica hace fácil la identificación de la resonancia y de las velocidades críticas. La información obtenida con el uso de un diagrama de Bode es también posible con el diagrama polar. Los diagramas de Bode y Polar/de Nyquist son iguales excepto en la manera de su presentación.

## **9.14 Análisis De Onda**

En la gran mayoría de ocasiones el analizador de espectros es utilizado como una herramienta de análisis, con las características recomendadas por sus diseñadores, para casi todas las señales de vibración. Eso ocurre parcialmente por la gran disponibilidad de analizadores TRF portátiles y baratos, verdaderas "cajas mágicas". Es importante considerar cuidadosamente lo que se hace y no suponer ciegamente que todas las señales de vibración se deben cambiar en espectros antes de estudiarlas.

El análisis del Dominio de Tiempo es sencillamente el uso de la **forma de onda** en lugar del espectro, para ayudar a diagnosticar problemas de máquinas, tales como los vistos en el desarrollo de la técnica en este documento, los **espectros** de un impulso o de una señal o **forma de onda** que empieza en una amplitud cero y de una señal aleatoria puede parecer exactamente iguales. Esto es válido aunque las señales sean muy diferentes en sus características.

La forma de onda enseña la diferencia inmediatamente, y por eso es una buena idea que el analista examine la forma de onda cuando el espectro no proporciona toda la información que se necesita para hacer un diagnóstico completo.

### ***Impactos vs Ruido Aleatorio.***

Los impactos pueden ser causados por rodamientos con elementos rodantes, donde las bolas encuentren una grieta o una pequeña astilla en un anillo de rodamiento. Si hay una gran cantidad de ruido externo, el espectro no tendrá un pico bien definido en la frecuencia del tono del rodamiento.

### ***Truncado o aplastado de la señal.***

En muchos casos de holgura, como en el caso del soporte principal de un rodamiento que se eleva ligeramente durante una parte de la rotación, y después hace contacto con la base durante el resto del ciclo, la forma de onda será aplastada por un lado. Esto resultará en armónicos en el espectro, pero otros tipos de distorsión de la forma de onda también producirán armónicos. La forma de onda proporciona una identificación rápida de este tipo de holgura, donde el movimiento está limitado en una dirección.

*Eventos de baja frecuencia.*

En algunos casos, la señal de vibración podrá tener una discontinuidad de vez en cuando. Cuando se transforma en el dominio de la **frecuencia**, su frecuencia será tan baja que no se podrá ver claramente en el **espectro**. Un ejemplo de eso es una caja de engranes de baja velocidad, que tiene un diente roto, o cuarteado (gran número de grietas) en el engrane grande.

Los pulsos producidos muchas veces por motores eléctricos no son verdaderos pulsos. Es modulación de amplitud de la vibración del motor a dos veces la proporción de deslizamiento del motor.

Pulsos que ocurren muchas veces en características únicas firmas<sup>5</sup> de motores eléctricos y en firmas de vibración general de grupos de máquinas similares, que giran casi a la misma velocidad. , se ven difícilmente en el dominio de la frecuencia, porque se necesita un espectro de alta resolución para resolver las dos frecuencias. Si se sospecha la existencia de pulsos, se debe realizar y examinar una larga grabación de la señal de tiempo. Los pulsos aparecerán inmediatamente, si están presentes.

Impactos aleatorios. Una parte de la máquina está floja y está pegando algo, a un ritmo que no tiene relación con la velocidad de la máquina.

Cuando se prepara un analizador, para almacenar formas de onda, se debe tener en mente un punto importante, el rango adecuado para examinar un espectro, por lo general no es adecuado para examinar la forma de onda. La mayoría de los analizadores TRF - con pocas excepciones - no permiten introducir proporciones específicas de muestreo o duraciones de la grabación en el dominio de tiempo hay que introducir en términos de rango de frecuencia y resolución de frecuencia. Debe recordarse que la duración en tiempo de la grabación que el analizador usa para calcular el espectro es el recíproco de la distancia entre las líneas del espectro.

---

<sup>5</sup> Una firma en una máquina o grupo de máquinas similares es como la huella digital en una persona, pues llegan a desarrollar características que las vuelven únicas sin llegar a confundir, diferenciándolas unas de otras. Ejemplo: el patrón de espectros en los síntomas de una falla "x".

Los espectros generalmente tienen una escala, que permite la evaluación de un largo rango de frecuencias, y cuando el analizador TRF está puesto para un rango de frecuencias relativamente alto, la duración de la grabación en tiempo será relativamente corta. Por ejemplo, un espectro de 400 líneas que se extiende desde 0 hasta 1000 Hz tiene una distancia entre líneas de  $1000/400 = 2.5$  Hz. La grabación en tiempo que se usa para calcular este espectro tiene una duración de  $1/2.5 = 0.4$  segundos. Esta grabación en tiempo, que es la forma de tiempo actual, nos enseñará los detalles de lo que pasó en este tiempo. Pero cuando se estudia una forma de onda, a veces se está interesado en eventos que ocurren en tiempos muchos más largos. Por ejemplo, si se buscan pulsos en la firma de vibración de un motor eléctrico, o si se examina la vibración combinada de dos máquinas que giran a velocidades ligeramente diferentes se necesita observar una forma de onda, que dure por lo menos unos segundos.

Para llegar a una forma de onda que dura cinco segundos, se debe introducir una distancia entre líneas de  $1/5$  Hz. y eso quiere decir un rango de baja frecuencia, o una alta resolución en el espectro correspondiente.

Para determinar la proporción de muestreo, de la forma de onda, y así su resolución en tiempo, otra vez se debe conseguir la información de las características del espectro. La proporción de muestreo para la grabación de tiempo, para la mayoría de los analizadores, es de 2.56 veces la frecuencia más alta en el espectro. Así, un rango de frecuencia de 100 Hz implica una proporción de muestreo de 256 muestras por segundo, y un rango de 1000 Hz necesita una proporción de 2560 muestras por segundo.

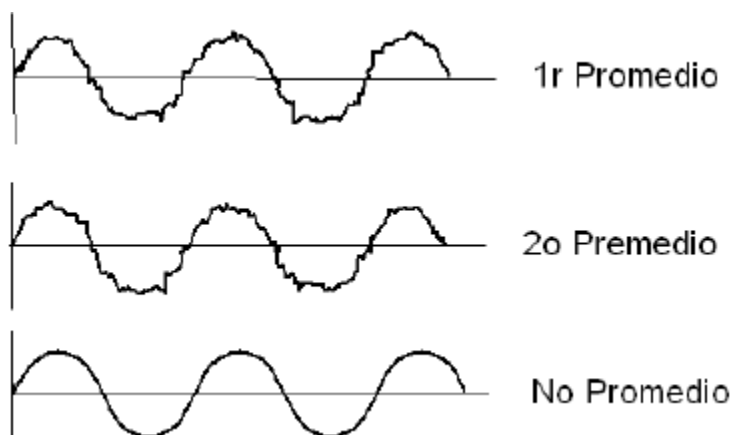
Para que una grabación en tiempo tenga sentido, debe tener mucho más puntos de datos que el espectro usual, y se tiene que cuidar que haya memoria suficiente para almacenar los datos de la forma de onda: para esto, lo mejor es usar la proporción de muestreo la más baja y la duración más corta de grabación de tiempo, que le van a proporcionar los datos que necesita. Por ejemplo, si solamente se quiere resolver pulsos en una onda, que ocurren una vez en varios segundos la proporción de muestreo no tiene que ser muy alta, 50 muestras por segundo probablemente será suficiente. Eso corresponde a un rango de frecuencias de  $50/2.5 = 20$  Hz.

Por otro lado, si se quieren examinar una forma de onda que tiene desviaciones interesantes 50 veces por segundo, entonces se tiene que muestrear lo suficientemente rápido para resolver cada desviación. Puede ser que se quiere tomar 1000 muestras por segundo para realizar el trabajo. Eso corresponde a un rango de frecuencias de  $1000/2.56 =$  alrededor de 390 Hz.

Una buena regla general es de memorizar que la duración de la grabación de tiempo solamente depende de la distancia de las líneas y que la proporción de muestreo solamente depende del rango de frecuencias, y los dos son ajustables de manera independiente.

### **9.14.1 Promedio en Tiempo Síncrono**

El promedio de tiempo síncrono, también llamado promedio en el dominio de tiempo, o sencillamente promedio sincrónico, es un tipo completamente diferente de promedio, donde la forma de onda está promediada y la memoria del instrumento digital se reservada para el almacenamiento temporal de información digital, (búfer), antes de que la TRF se calcule. Para poder llevar a cabo el promedio en el dominio de tiempo, un pulso disparador de referencia debe ser introducido en el analizador para informar cuando tiene que empezar a tomar muestras de la señal. Este pulso disparador está sincrónico con un elemento de la máquina, que es de interés, como la rotación de la flecha por ejemplo.



**Fig. 9-70: promedio síncrono.**

En la Fig. 9-70 la gráfica arriba enseña el efecto de la contaminación de la señal de vibración 1X, con ruido aleatorio. El ruido, siendo aleatorio, tiene una fase aleatoria. En otras palabras, no tiene coherencia de una grabación en tiempo hasta la otra, y su promedio

se cancela a sí mismo. El componente 1x tiene la misma fase con referencia al pulso del tacómetro que se usa como disparador, para el analizador, y el proceso de promedio lo reforzará.

Cuando se lleva a cabo el promedio en el dominio de tiempo de una señal de vibración de una máquina real, la grabación de tiempo promediada va acumulando gradualmente esas porciones de la señal que están sincrónicas con el disparador. Los promedios de otras partes de la señal, como el ruido y otros componentes, como de otras partes rotativas de la máquina se cancelan efectivamente. Este es el único tipo de promedio que disminuye el ruido.

*¡Es importante notar, que en el caso de rodamientos con elementos rodantes, las frecuencias de vibración no sincrónicas indicativas (tonos de rodamientos) no son sincronizados con las RPM y se van a cancelar sus promedios! No debe intentarse usar el promedio en el dominio de tiempo para encontrar esta frecuencia no sincrónicas.*

Un ejemplo del uso del promedio en el dominio de tiempo es la medición de la vibración de máquina en presencia de vibración de fondo excesiva que proviene de máquinas cercanas o de otras fuentes. En este caso, el disparador viene de un tacómetro, conectado con la flecha principal. El tacómetro está puesto para dar un pulso por revolución de la flecha, y todo en el espectro, relacionado con las partes rotativas será incrementado y todas las otras señales serán reducidas.

# **CAPÍTULO II**

## **APLICACIÓN DE LAS TÉCNICAS PREDICTIVAS**



## **SUMARIO**

---

En este capítulo se estudiarán tres casos en particular donde se ponen en práctica algunas de las técnicas estudiadas con anterioridad apreciándose la utilidad de contar con este tipo de mantenimiento como una buena opción de reducir los costos tales como paros no programados y en tiempo.

Los casos ocurrieron en empresas locales del país salvadoreño.

## INDICE

<i>Contenido</i>	<i>Pág.</i>
<b>II CASOS DE APLICACIÓN DE LAS TÉCNICAS PREDICTIVAS.....</b>	<b>467</b>
<b>10.0 Inspección del piñón de ataque del reductor de baja de un molino de caña.....</b>	<b>470</b>
<b>11.0 Fallo en rodamiento lado acople del motor de transportadora de bagazo.....</b>	<b>489</b>
<b>12.0 Diagnóstico de desbalance en ventilador.....</b>	<b>496</b>

## **10.0 Inspección del piñón de ataque del reductor de baja de un molino de caña**

---

### **10.1 Introducción**

Dentro del programa de mantenimiento que sigue a un fin de zafra, las inspecciones de los activos es una etapa primordial para la detección de posibles daños en estos elementos a inspeccionar.

Las técnicas no destructivas del mantenimiento predictivo juegan un papel muy importante a la hora de realizar inspecciones y detección de posibles defectos que a simple vista pueden pasar desapercibidos y ocasionar fallos durante el período de producción.

### **10.2 Descripción del activo.**

<b>ID: 201.01200</b>	
Rpm alta:	29.93
Rpm baja:	7
Diámetro promedio:	20 pulg.
Tipo de material de los engranes:	Acero al Manganeso con aleaciones de Níquel y Cromo
Dureza de material de los engranes:	40 a 45 RC
# dientes	29

Tabla 10-1: datos técnicos de piñón.

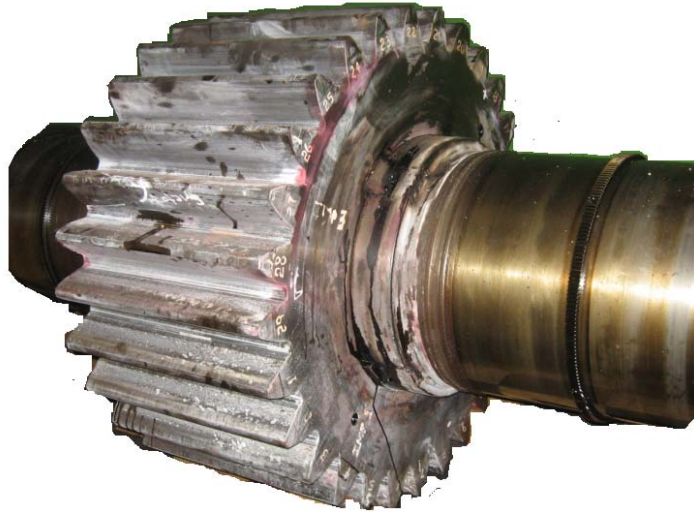


Fig. 10-1: Piñón bajo inspección.

### **10.3 Técnicas aplicadas**

Las técnicas no destructivas aplicadas para examinar este elemento son:

- Inspección por partículas magnéticas.
- Inspección con líquidos penetrantes.
- Ultrasonido.

Tanto la técnica de partículas magnéticas como la de líquidos penetrantes permiten detectar las discontinuidades en el material del elemento a ser inspeccionado. Las partículas magnéticas tiene la ventaja de identificar discontinuidades subsuperficiales. El uso de ultrasonido es utilizado en este caso para determinar la profundidad de la grieta una vez descubierta.

### **10.4 Inspección por partículas magnéticas**

El procedimiento correcto para la aplicación de esta técnica es el siguiente:

- **Identificación de la superficie a inspeccionar:** esto es relevante para seleccionar el tipo de partículas a utilizar, secas, suspendidas en un medio fluido, fluorescentes o de algún determinado color (esto es importante para obtener un contraste que permita observar e identificar las grietas).



**Fig. 10-2:** Pieza bajo inspección.

- *Conjunto de inspección a utilizar:*



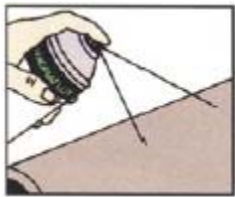
**Fig. 10-3:** conjunto de inspección.



**Fig. 10-4:** kit de inspección.

- **Secuencia de proceso:**

**Limpieza**



Limpieza de la superficie a inspeccionar, esta se puede realizar con producto especial de limpieza, aunque estos muy costosos, pero se tiene la opción de realizar esta limpieza con solvente.

**Ubicación del YUGO**



Colocación del yugo en la superficie de la pieza a inspeccionar, se debe tener presente que la corriente de magnetización es perpendicular a la dirección de las discontinuidades a detectar.

**Magnetización**



Se energiza el yugo y se desliza sobre el área a chequear. Es buena práctica realizar magnetizaciones en direcciones perpendiculares para poder detectar grietas en las distintas direcciones posibles.

**Aplicación de las partículas magnetizables**



Luego de realizar la magnetización y aun con el yugo energizado se aplican las partículas indistintamente si son secas o suspendidas en agua.

**Identificación de las grietas**



La indicación de la fisura aparecerá instantáneamente, si no se utiliza partículas fluorescentes, en caso contrario se debe utilizar una lámpara de luz ultravioleta para poder visualizar las grietas.



Fig. 10-5: aplicación partículas e inspección de grietas.

### **10.4.1 Resultados de inspección**

- 1) Grieta rodeando diente N°27 y pitting en los dientes en toda su longitud
- 2) La longitud de la grieta es 9”.

## 10.5 Inspección por líquidos penetrantes

La inspección por líquidos penetrantes nos permite identificar fisuras o grietas superficiales y tienen la ventaja de poder ser usado inclusive en materiales que no sean magnetizables. Sin embargo se debe evitar en materiales que posean porosidades. Las superficies deberán estar libres de materiales extraños y pintura que impidan la penetración de los defectos o retengan penetrante innecesario. La grasa, los aceites, etc. impiden la penetración, por lo que deberán ser eliminados limpiando previamente la zona a inspeccionar.

El equipo utilizado para la inspección por líquidos penetrantes es el que se muestra en la Fig. 1-6 a continuación:



Fig. 10-6: Parte del Equipos de inspección.

El equipo consiste de un limpiador de superficie, el líquido de penetración y un revelador, estos vienen en spray y permiten una aplicación sencilla.

El proceso aplicado a esta inspección es el siguiente:



- *Limpieza de la zona a inspeccionar.*



Fig. 10-7: Inspección de superficie a analizar.

Para efectuar el proceso de pre limpieza, se rocía el limpiador sobre la pieza a ser inspeccionada. Se debe permitir que el limpiador permanezca en la pieza el tiempo suficiente para que la suciedad o la película se disuelva. Secar con un paño limpio.

- *Aplicación del líquido penetrante*



Fig. 10-8: Aplicación del líquido penetrante.

Se rocía el penetrante sobre la pieza o sección a ser inspeccionada hasta que la superficie quede cubierta (Fig. 10-8). Hay que permitir que el penetrante permanezca en la pieza durante un

tiempo. Por lo general, 10 minutos bastarán en piezas limpias, soldaduras y la mayoría de los defectos. Los tiempos de penetración más prolongados no afectarán los resultados.

- *Remover el líquido penetrante*



Fig. 10-9: Remoción del exceso de líquido penetrante.

Una vez transcurrido el tiempo suficiente de penetración, se limpia la superficie con una toalla o paño limpio. Se debe repetir si es necesario. Algunas superficies requerirán solamente que se les pase un paño. En general, sin embargo, se debe eliminar el exceso de penetrante que se observe en la superficie con paños limpios humedecidos en Limpiador/Removedor. **NO se debe aplicar un chorro de Limpiador/Removedor sobre la superficie, porque se menoscabará la sensibilidad.** Se debe repetir este procedimiento y secar el área pasándole un paño hasta eliminar por completo el penetrante residual.

- *Aplicación del revelador*

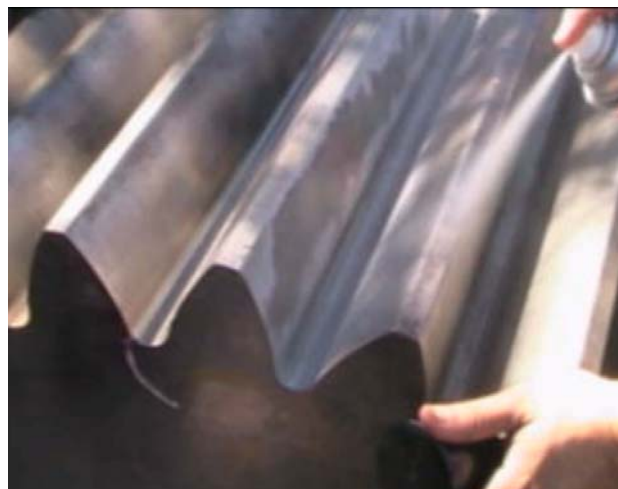
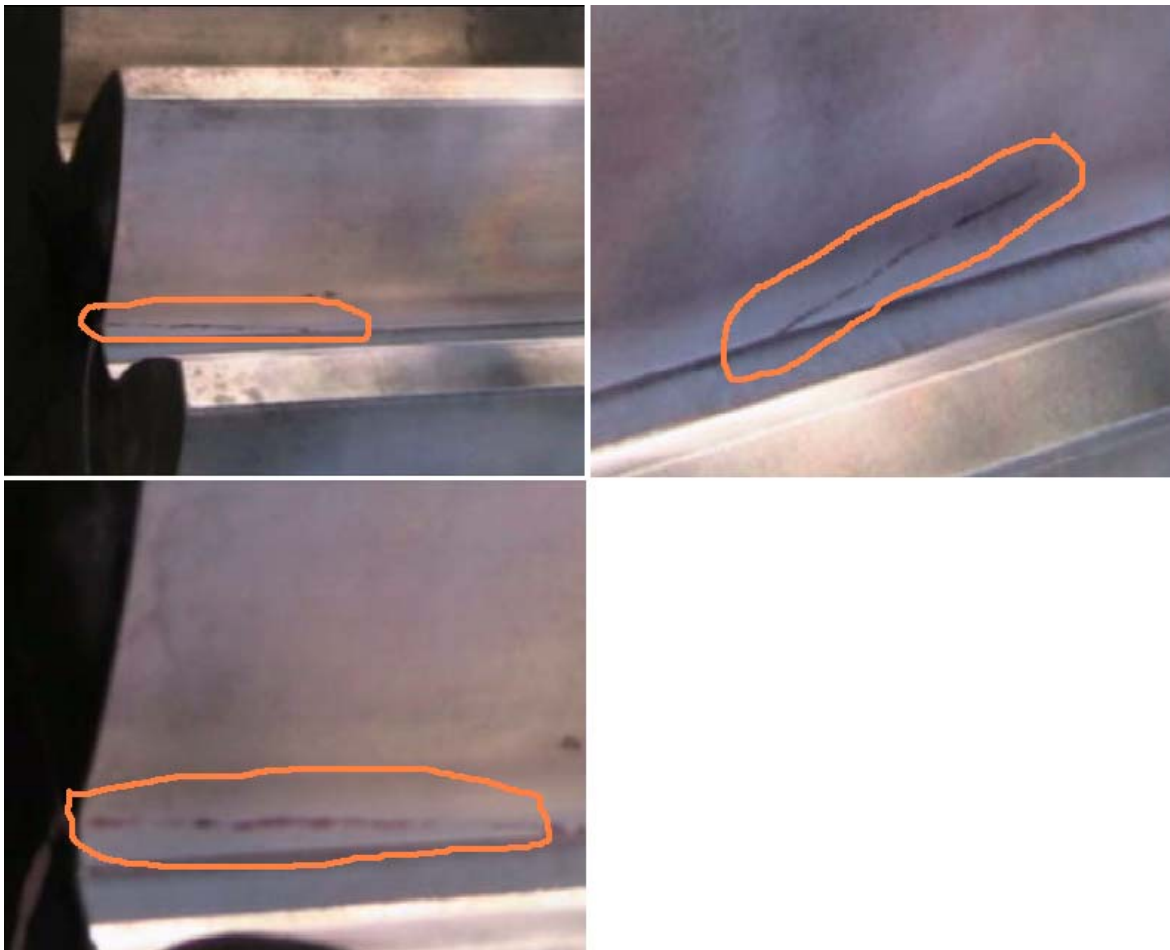


Fig. 10-10: Aplicación del revelador.

Se debe agitar la lata vigorosamente hasta que los agitadores suenen en el interior. El rociado del revelador sobre la pieza o sección, debe ser en una cantidad suficiente para humedecer el área con una película delgada y uniforme. Si el espesor de la película es el adecuado, ésta se secará formando una capa blanca delgada. Por el contrario, si la cantidad de revelador aplicada es excesiva, las marcas quedarán ocultas, mientras que, de ser escasa, éstas no se revelarán suficientemente. Es buena practicas la aplicación del revelador por secciones de 6 a 8 pulgadas de longitud por vez. Hay que permitir que el revelador se seque. Las grietas gruesas se manifestarán inmediatamente, mientras que las diminutas podrían tardar unos cuantos minutos en revelarse por completo.

Nota: En el caso de superficies ásperas, el polvo de revelador seco permite obtener resultados superiores.

- ***La inspección.***



**Fig. 10-11: identificación de grietas.**

La facilidad de identificación de las grietas es relativa. Si el defecto es ancho y profundo, la indicación crecerá y se expandirá. Por otra parte, las porosidades, contracciones, falta de cohesión y fugas aparecerán como puntos o áreas resplandecientes bajo la luz negra (en el caso de líquido fluorescente). Estas indicaciones también crecerán y se expandirán si el defecto es grande o extenso.

En la Fig. 10-11 puede observarse con claridad, la grieta sobre el diente del piñón de ataque del reductor del molino.

Tanto con partículas magnéticas como con líquidos penetrantes se logro detectar esta discontinuidad sobre el diente del piñón. La determinación de cual metodo utilizar es criterio del técnico encargado de realizar dicha inspección tomando como base las recomendaciones expresadas en la unidad I de este trabajo, específicamente en cada una de las técnicas desarrolladas en el mismo.

## **10.6 Medición de la profundidad de la grieta mediante la técnica de ultrasonido**

Antes de la medición con la técnica de ultrasonido es recomendable tener el diagrama de la pieza ha inspeccionar, debido a que la pieza puede tener agujeros que pueden ser parte del diseño como agujeros de lubricación etc. también hay que tomar en cuenta el material de la pieza; así como donde hay la mayor concentración de esfuerzos debido a que es ahí donde están las áreas críticas por lo que hay que ponerles la atención debida (hay que tener en cuenta que los datos pueden ser reflejo de la experiencia de la persona que hace la inspección).

### **10.6.1 Paso 1: calibración del equipo**

Como primer paso en la toma de la medida con el equipo de ultrasonido es calibrar el equipo con los correspondientes bloques de calibración, estos datos se almacenan en la memoria del equipo y este está listo para el monitoreo de la falla. Los bloques de calibración en el ensayo por contacto se usan para comprobar el funcionamiento del equipo ultrasónico y del transductor, y para efectuar la regulación del instrumento a fin de que éste se adapte a las condiciones del ensayo.

Durante la calibración es necesario tomar en cuenta el diámetro de la pieza (Fig. 10-12) para poder poner el rango de la escala del equipo.



Fig. 10-12: identificación de grietas.

Los valores de calibración en este ensayo son los que a continuación se detallan:

- Angulo de  $60^0$  (por ser una zapata de  $60^0$ )
- Velocidad del sonido de  $0.32\mu$  de pulg/seg.
- En la escala utilizada cada división hace referencia a una pulgada.

Hay tener en cuenta que la calibración no solo es por el material a inspeccionar sino también por el desgaste que sufre la zapata o la cuña que hace el contacto con la pieza. La Fig. 10-13 denota los parámetros a calibra dentro del equipo.

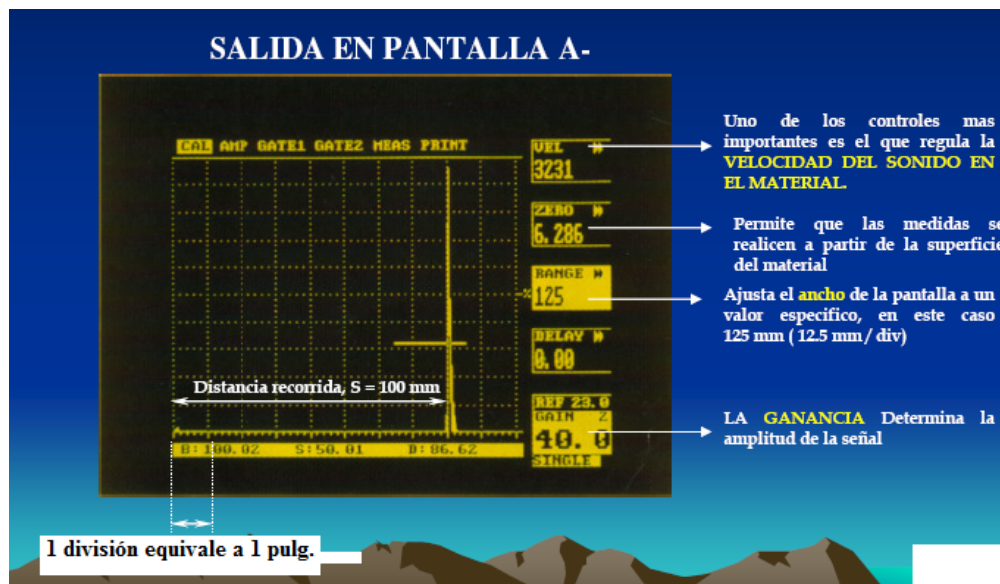


Fig. 10-13: Parámetros de calibración.

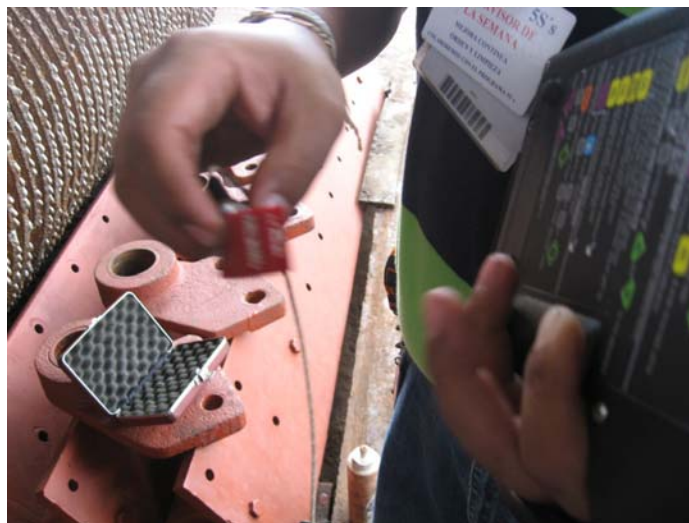
Cuando una pieza deberá ser ensayada ultrasónicamente por ejemplo por seguridad se deberá tener en cuenta esto desde su proyecto.

Tanto en los materiales provistos como en la manufacturación y procesos de maquinado los posibles eventuales defectos y su posicionamiento pueden ser previamente estimados en la mayoría de los casos por lo que deberían ser consideradas áreas adecuadas para el acoplamiento geometrías acústicas simples para una evaluación fácil de los resultados del ensayo. Ecos causados por la geometría de la pieza o por conversión de ondas pueden ser evitados con geometrías adecuadas. Sin embargo hoy en día, estos requerimientos no son satisfactoriamente considerados haciendo frecuentemente que el ensayo sea dificultoso, caro y hasta imposible de realizar.

### **10.6.2 Paso 2: selección del palpador.**

A primera vista parece ser difícil la selección del palpador óptimo por la gran variedad de unidades disponibles para un problema de ensayo particular. La elección será facilitada cuando, antes que nada, se fije el procedimiento de ensayo y luego, en el orden que sigue, la dirección de penetración del sonido, frecuencia de ensayo y tamaño del cristal.

En la práctica se utiliza una cuña (zapata) de  $60^{\circ}$ , ya que lo que se pretende es medir la longitud de la grieta y no localizarla como se haría con un palpador normal (Fig. 10-14)



**Fig. 10-14: Palpador normal.**

El palpador angular consiste esencialmente de un cristal cementado a una cuña de plexiglás. De esta forma se consigue una incidencia oblicua sobre la superficie de la pieza.

Los haces reflejados vuelven a la cuña plástica y, o son absorbidos por un atenuador convirtiéndose en calor, o se evita el retorno al transductor con una adecuada forma de la cuña

para evitar causar indicaciones de ecos perturbadores. Dentro de la pieza se propagarán la onda longitudinal refractada y, adicionalmente, la nueva onda transversal generada.

### **10.6.3 Paso 3: acoplamiento**

En el ensayo práctico es preciso asegurar el fácil pasaje de las ondas ultrasónicas desde el palpador a la pieza de ensayo y viceversa, para obtener resultados seguros y reproducibles. Por esto, se debe remover todo el aire entre ellos lo que se realiza con el mojado de la superficie de la pieza por medio de un líquido o una pasta. El acoplante óptimo será el que, con un espesor de  $1/4$ , tenga una impedancia acústica igual a la media geométrica de las impedancias en los dos medios adyacentes.

En la práctica también hay que tener en cuenta que tanto el palpador como la superficie de la pieza hay que aplicar el acoplante y así asegurar el fácil paso del sonido entre los dos medios (Fig. 10-15, a y b).



**a**



**b**

**Fig. 10-15: aplicación del acoplante.**

### **10.6.4 Paso 4: sondeo del área de la falla**

Como siguiente paso se coloca el palpador en el área cercana a la grieta, y luego se desplaza éste hasta obtener la señal (Fig. 10-16).



**Fig. 10-16: ubicación del palpador.**

Es importante verificar la posición de la zapata para que el sonido viaje en la dirección que deseamos (Fig. 10-17).



**Fig. 10-17: posicionamiento de la zapata.**

Es importante saber que el equipo trabaja mediante el teorema de Pitágoras en el cual este se encarga de calcular los diferentes lados del triángulo que forma el sonido emitido por el mismo según la falla encontrada; así en este ensayo tenemos en la hipotenusa un valor de 5.3 pulg, en el cateto opuesto 4.2 pulg. y en el cateto adyacente 4.5 (Fig. 10-18).



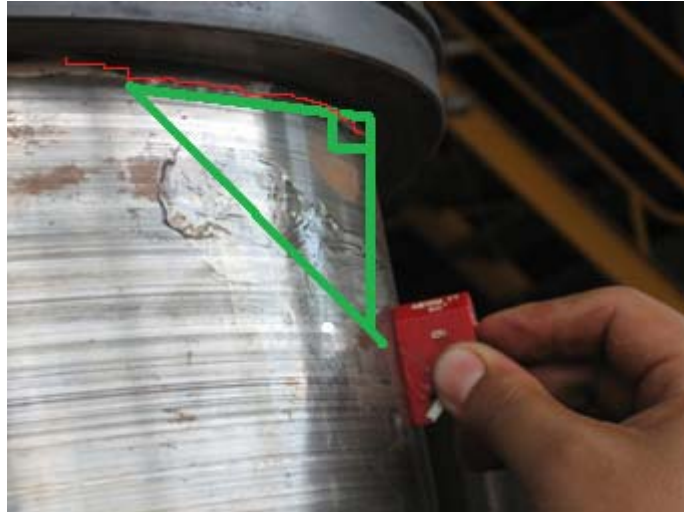


Fig. 10-18: teorema de Pitágoras.

### 10.6.5 Paso 5: monitoreo de la señal de la gráfica

La interpretación de la gráfica es de suma importancia ya que mediante esta es donde nos damos cuenta la magnitud de la falla (Fig. 10-19).

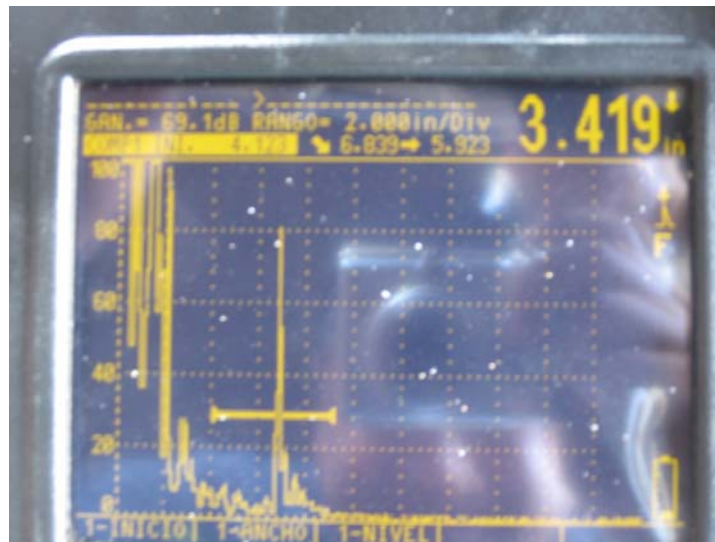


Fig. 10-19: gráfica generada.

Según la gráfica mostrada, esta presenta un pico que representa la falla (grieta) este pico es sondeado por medio de cuatro teclas que posee el equipo, estas teclas manipulan un cursor que se representa en la pantalla del equipo como una línea transversal al pico de la falla y es de esta manera que podemos conocer la profundidad de la falla, siendo el valor más alto la profundidad, este valor aparece en la parte superior derecha de la pantalla como se muestra en la fotografía.

También se puede observar que en la fotografía aparecen otras señales al lado izquierdo del pico de la falla estas señales representan el ruido que los transductores poseen internamente y estas pueden ser eliminadas mediante la configuración del equipo.

## **10.7 Resultados De Inspección**

Tal cual se logro detectar con la inspección con partículas magnéticas se obtuvieron los mismos resultados:

- 1) Grieta rodeando diente N°27 y picaduras de los dientes en toda su longitud
- 2) La longitud de la grieta es 9”

## **10.8 Estudio de Costos**

El estudio de costos realizado para este activo, consiste en el caso hipotético (costo potencial) de una fisura no detectada en el diente del piñón, lo que implicaría la pérdida de un diente durante su funcionamiento en el periodo de producción, siendo este un daño irreparable para el piñón. Para este caso no existe perdida de producción puesto que este molino puede ser pasado por alto. No obstante se tendría que adquirir otro piñón lo cual por sus dimensiones grandes seria un costo bastante alto.

El costo de oportunidad en contra posición del costo potencial, analiza los costos de haber detectado una fisura en el diente a través de técnicas predictivas, y realizar los trabajos de mantenimiento preventivo respectivos, conforme las recomendaciones de predictivo.

## Costo Potencial / Costo De Inversión

TABLA DE COSTO POTENCIAL			
Caso: Fallo Potencial piñón de ataque molino #6			
*Tiempo de parada en días (del molino #6):	0	días	0
			horas
Producción costo hora:	\$0.00		
	<b>Producción</b>		<b>Mantenimiento</b>
	\$0,00		\$20.540,83
			Piñón
			\$8,299.00
			fusible de reductor
			\$1.320,00
			Aceite de reductor y chumaceras(3 barriles)
			\$150,00
			Materiales
			\$0,00
			Chumaceras
			\$1000,00
			Grúa
			\$0,00
			\$0,00
			\$0,00
			\$0,00
			<b>\$78.24</b>
			<i>Costo hrs/hombre</i>
<b>Costo</b>	\$0,00		<b>\$31.388,07</b>
			<i>Costo total de mtto</i>
<b>COSTO TOTAL</b>	<b>\$31.338,07</b>		

\* La parada del molino #6, no detiene la producción, en caso de fallo se by-pasea.

### Horas hombre:

Personal	Costo hora	Cantidad de personal	No. Hr/hombre día	Costo diario
Mecánico	\$2,08	4	8	\$66.56
Soldador	\$0,00	0	0	\$0,00
operador de grua	\$1.46	1	8	\$11.68
Instrumentista	\$0,00	0	0	\$0,00
Eléctricos	\$0,00	0	0	\$0,00
Predictivo	\$0,00	0	0	\$0,00
<b>TOTAL</b>			<b>16</b>	<b>\$78,24</b>

*Herramientas y técnicas del mantenimiento Predictivo.*

**TABLA DE COSTO DE INVERSION**

Caso: Ejecución Recomendaciones			
Tiempo de parada en días:	0		0
Producción costo hora:	\$0,00		
	Producción		Mantenimiento
	\$0,00		\$3.383,07
			piñón (reparación)
			300Lb Electrodo
			oxigeno (6 cilindros)
			propano
			Pulidora (6 disc.)
			\$0,00
			\$0,00
			\$0,00
			\$0,00
			\$0,00
			\$225,00
			Material de inspección
			\$203,04
			Costo hrs/hombre
<b>Costo</b>	\$0,00		<b>\$3,811.11</b>
<b>COSTO TOTAL</b>	<b>\$3,811.11</b>		<b>costo total de mtto</b>

Horas hombre:

Personal	Costo hora	Cantidad de personal	No. Hr/hombre día	Costo diario
Mecánico	\$2,08	4	4	\$33.28
Soldador	\$2,08	3	24	\$149,76
operador de grua	\$1,46	1	8	\$11,68
Instrumentista	\$0,00	0	0	\$0,00
Eléctricos	\$0,00	0	0	\$0,00
Predictivo	\$2,08	1	4	\$8,32
<b>TOTAL</b>			<b>40</b>	<b>\$203.04</b>

ESTIMACIÓN DE AHORROS:

Ahorro = costo potencial – costo de inversión

<b>AHORRO:</b>	<b>\$27,576.96</b>
----------------	--------------------

$$\text{Porcentaje de ahorro} = \frac{\text{ahorro}}{\text{Costo\_Potencial}} \times 100\%$$

<b>PORCENTAJE DE AHORRO:</b>	<b>87,86%</b>
------------------------------	---------------

## **11.0 Fallo en rodamiento lado acople del motor de transportadora de bagazo**

---

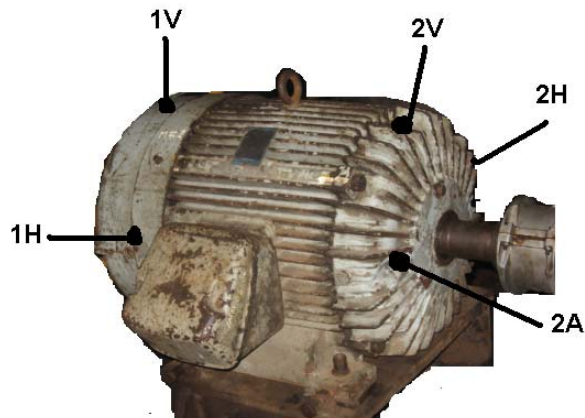
### **11.1 Introducción**

El motor de la transportadora de bagazo 3, está considerado como un activo crítico, debido a que un daño en este motor provoca un paro en la producción. Por ser un activo crítico este se monitorea una vez en cada turno de 8 horas, durante todo el periodo de producción.

### **11.2 Detección de un parámetro de vibración fuera de lo normal**

*Información del activo:*

<b>ID:</b>	
Potencia:	100 HP
Rpm:	1785
Rodamiento LA:	6316
Rodamiento LL:	6316



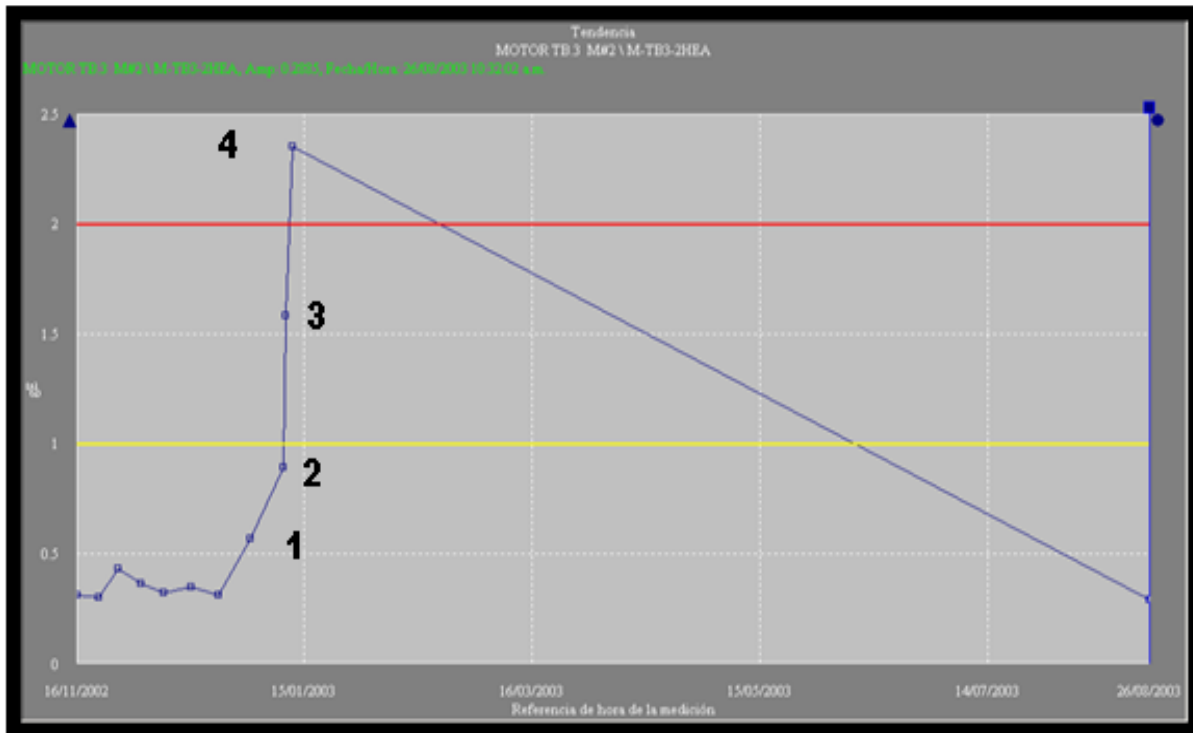
**Fig. 11-1: puntos de medición.**

Los niveles de alarma para este motor están establecidos de la siguiente manera:

A1 Alerta global: 1gE

A2 Peligro global: 2gE

Durante un monitoreo rutinario en periodo de zafra, se detecto un incremento del nivel de vibración fuera de los parámetros normales de funcionamiento para el motor de la transportadora de bagazo 3, como puede observarse en la Fig. 11-1.



**Fig. 11-2: Tendencia del valor global de envolvente de aceleración del rodamiento.**

Se observa, como la envolvente de aceleración se incrementa fuera de rango normal en el punto señalado como 1 en la Fig.11-2, sin embargo aun no se llega a los niveles de alarma preestablecidos. El punto señalado como 2 muestra la tendencia en aumento de vibración, aun sin sobrepasar el nivel de alarma 1 (A1). El punto 3 indica un límite de alarma sobrepasado llegando hasta el nivel de alarma 2 como puede observarse la medición marcada como punto 4.

Al revisar la Fig. 11-2 anterior puede establecerse, un daño en el rodamiento del motor y que este sigue incrementándose de medición en medición; sin embargo no podemos detectar la causa o específicamente que es lo que está provocando este incremento de vibración. Un análisis más profundo debe hacer a través del espectro de vibración, tal cual se muestra en la Fig. 11-3.

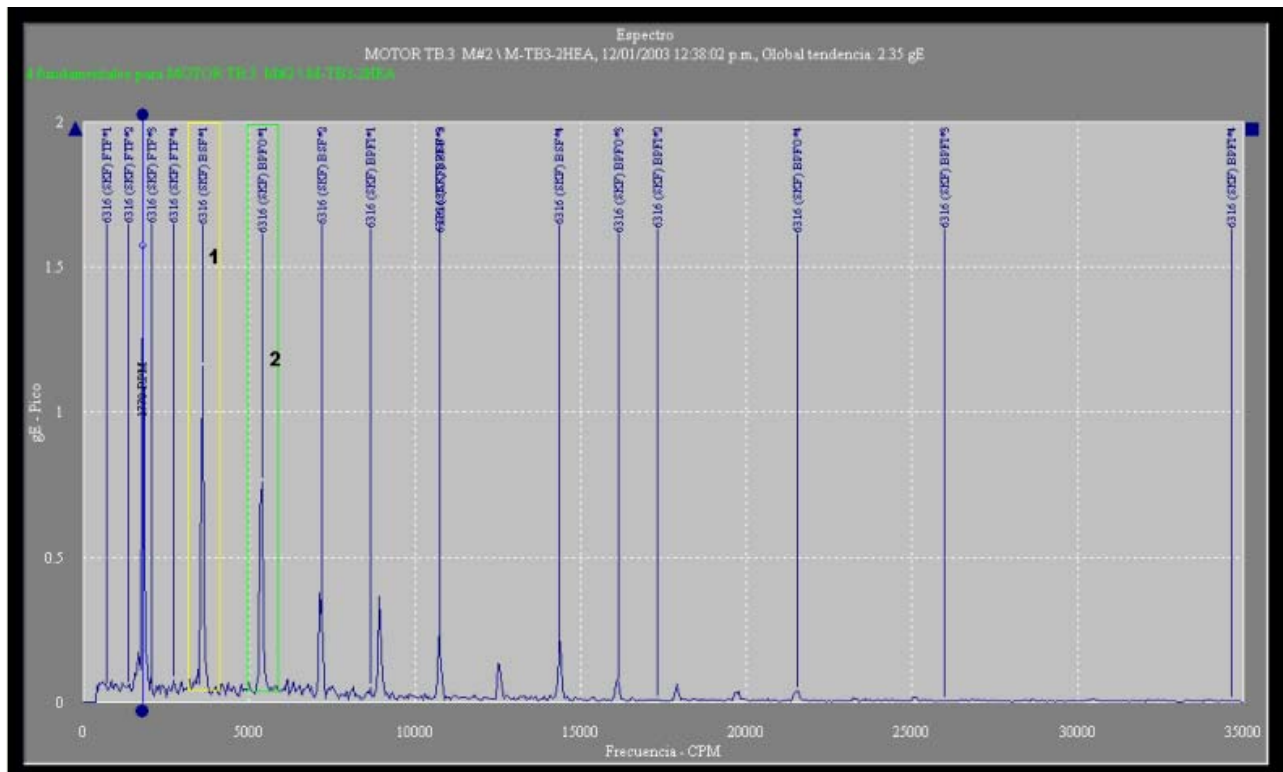


Fig.11-3: Espectro de envolvente de aceleración.

En la Fig.11-3, se observa un espectro de envolvente de aceleración, dentro del cual al superponer las frecuencias de fallo características del rodamiento específico, permiten identificar un daño en el elemento rodante (pico enmarcado en recuadro amarillo) y en la pista externa del rodamiento (pico enmarcado en recuadro verde).

Una detección a tiempo del posible fallo permitió el cambio del rodamiento antes de que este causara un daño mucho mayor al motor (posible recalentamiento y fundido) y lo que es peor un paro de producción no programado, algo que arrastraría pérdidas económicas bastante altas.

Al observar la gráfica de la Fig. 11-4, vemos como el valor global de vibración envolvente disminuye drásticamente al realizar las tareas de mantenimiento recomendadas por el departamento de predictivo.

Vemos pues, en la medición post cambio del rodamiento, como la vibración baja de aproximadamente 2.36 gE, a 0.2885 gE.





## Costos Potenciales / Costo De Inversión

TABLA DE COSTO POTENCIAL				
Caso: Fallo Potencial transportador de bagazo #3				
Tiempo de parada en días:	1		8	
Producción costo hora:	\$42.288,00			
	Producción		Mantenimiento	
	\$338.304,00		<b>\$1.260,00</b>	Motor (reparación)
			\$800,00	rebobinado
			\$40,00	papel
			\$420,00	Alambre
			\$75,00	Rodamientos de motor
			\$100,00	Materiales
			\$0,00	
			\$0,00	
			\$0,00	
			\$0,00	
			<b>\$116,48</b>	<b>Costo hrs/hombre</b>
<b>Costo</b>	\$338.304,00		<b>\$1.551,48</b>	<b>Costo total de mtto</b>
<b>COSTO TOTAL</b>	<b>\$339.855,48</b>			

Horas hombre:

Personal	Costo hora	Cantidad de personal	No. Hr/hombre día	Costo diario
Mecánico	\$2,08	3	8	\$33,28
Soldador	\$0,00	0	0	\$0,00
Ayudante	\$0,00	0	0	\$0,00
Instrumentista	\$0,00	0	0	\$0,00
Eléctricos	\$2,08	2	8	\$66,56
Predictivo	\$2,08	1	8	\$16,64
<b>TOTAL</b>			<b>24</b>	<b>\$116,48</b>

*Herramientas y técnicas del mantenimiento Predictivo.*

TABLA DE COSTO DE INVERSION				
Caso: Ejecución Recomendaciones				
Tiempo de parada en días:	0.25	día	2	horas
Producción costo hora:	\$42.288,00			
	Producción		Mantenimiento	
	\$84.576,00		\$0,00	motor
			\$75,00	Rodamientos de motor
			\$100,00	Materiales
			\$0,00	
			\$0,00	
			\$0,00	
			\$0,00	
			\$0,00	
			\$0,00	
			\$0,00	
			\$24,96	Costo hrs/hombre
<b>Costo</b>	\$84.576,00		<b>\$199.96</b>	<b>costo de mantenimiento</b>
<b>COSTO TOTAL</b>	<b>\$84.775,96</b>			

Horas hombre:

Personal	Costo hora	Cantidad de personal	No. Hr/hombre día	Costo diario
Mecánico	\$2,08	3	24	\$49,92
Soldador	\$0,00	0	0	\$0,00
Ayudante	\$0,00	0	0	\$0,00
Instrumentista	\$0,00	0	0	\$0,00
Eléctricos	\$2,08	2	16	\$33,28
Predictivo	\$2,08	1	8	\$16,64
<b>TOTAL</b>			<b>48</b>	<b>\$99,84</b>

ESTIMACIÓN DE AHORROS:

Ahorro = costo potencial – costo de inversión

**AHORRO:**

**\$255.079,52**

$$\text{Porcentaje de ahorro} = \frac{\text{ahorro}}{\text{Costo\_Potencial}} \times 100\%$$

**PORCENTAJE DE AHORRO:**

**75.06%**

## 12.0 Diagnóstico de desbalance en ventilador

### 12.1 Análisis de la tendencia de vibración en el ventilador

El control de la tendencia de los valores globales de vibración de una maquina, nos permite observar el comportamiento de esta en rangos de tiempo determinados, la Fig. 12-1 muestra la tendencia de los valores globales de vibración desde el periodo de zafra 2002-2003 hasta la zafra 2006-2007. En ella puede observarse la fluctuación de los valores globales para el periodo 2006-2007 entre los niveles de alarma (alerta alta 6 mm/seg.; peligro alto 10 mm/seg. ). Sin embargo esta gráfica no permite predecir la falla que esta generando estas elevadas vibraciones.

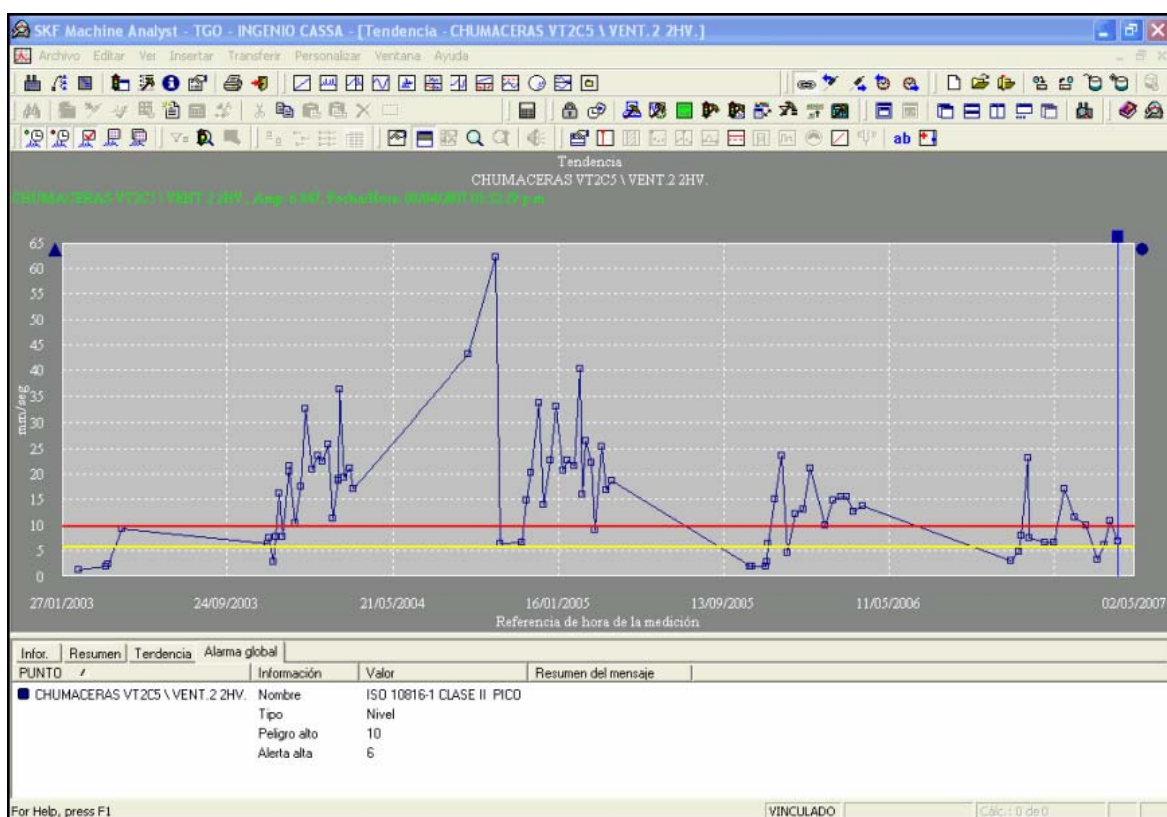


Fig. 12-1: Gráfica de tendencia del ventilador de un tiro inducido.

## 12.2 Analizando el espectro de vibración

Para poder hacer un diagnostico preciso de la falla causante de las elevadas vibraciones se debe analizar los espectros de frecuencia, para este ventilador clasificado como CLASE II (NORMA ISO 10816-1), se puede observar su espectro de frecuencia en la Fig. 12-2.

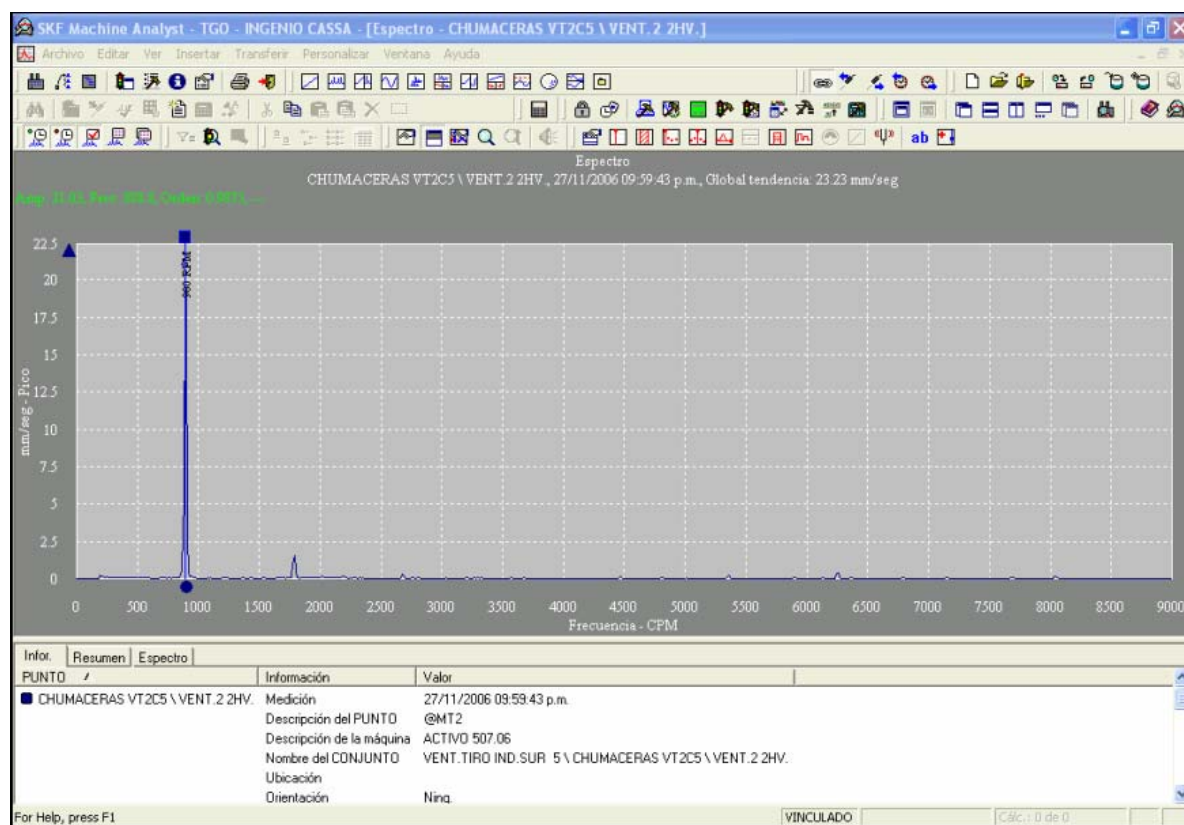


Fig. 12-2: Espectro de frecuencia característico de un desbalance.

En la Fig. 12-2, puede observarse un espectro característico de un desbalance dinámico en el ventilador, donde su pico mas alto se observa a 1X, es decir a la velocidad de operación del ventilador, con una amplitud de la velocidad de vibración de 21.03 mm/seg. Pico.

El desbalance en este tipo de ventilador es producido por la ceniza proveniente de las calderas, las cuales se sedimentan en los alabes del ventilador, provocando que su centro de rotación no coincida con su centro de gravedad, dando como resultado la excesiva vibración a la frecuencia de operación del mismo.

## 12.3 El espectro luego de un balanceo

En la Fig. 12-3 puede observarse el espectro de frecuencia de este ventilador en condiciones normales de funcionamiento, con una amplitud de vibración de 2.48 mm/seg. pico, en contraste con la amplitud reflejada en la Fig. 3-2, del ventilador en condición de desbalance.

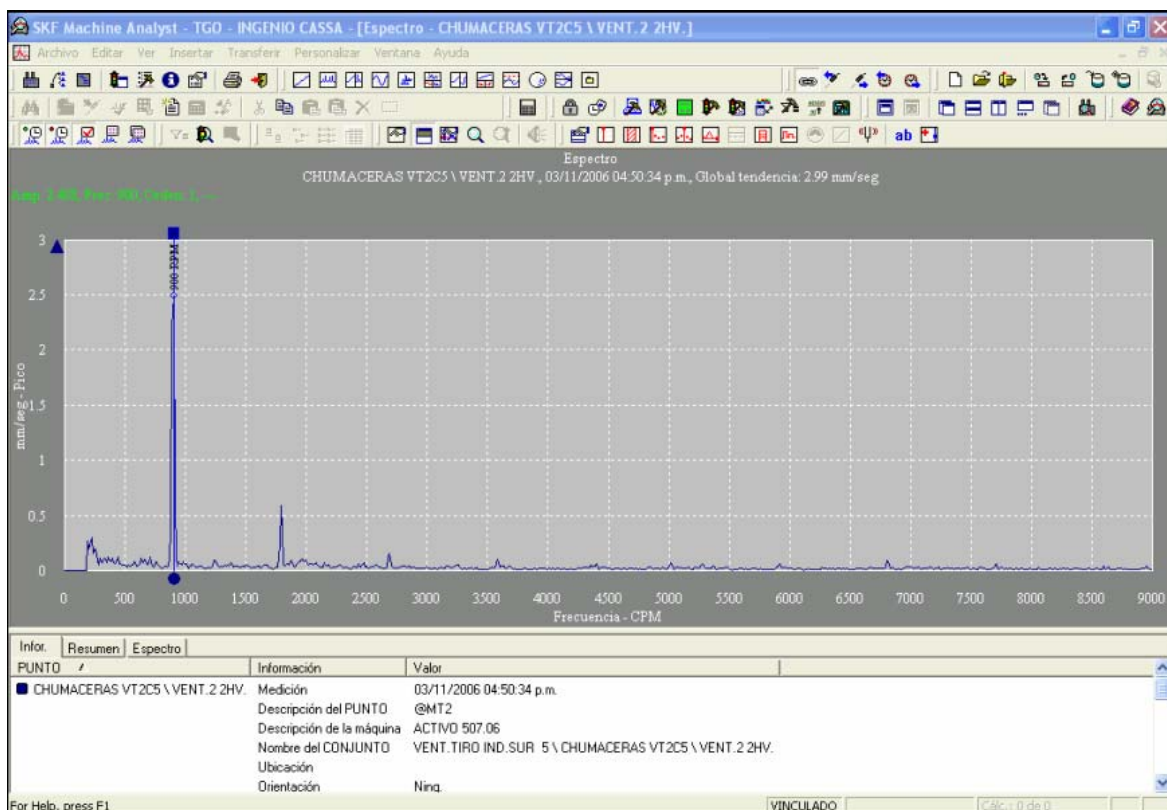


Fig. 12-3: Espectro de frecuencia con vibración normal.

Luego de diagnosticar el desbalance en el ventilador y hacer las correcciones respectivas al problema, una medición de la vibración post mantenimiento debe reflejar un espectro similar al de la Fig. 12-3, con lo cual puede aseverarse la buena condición de la máquina y ponerlo en operación inmediatamente.

# **CAPÍTULO III**

## **CONSIDERACIONES PREVIAS PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE UN LABORATORIO DE TÉCNICAS PREDICTIVAS**



## **SUMARIO**

---

En este capítulo se tratara lo que no se debe descuidar al tomar en cuenta en la instalación de un laboratorio para ensayos no destructivos equipado con herramientas del mantenimiento predictivo. Se determinaran los requisitos normativos, equipo mínimo, normas de seguridad, capacitación del personal, etc.

## INDICE

<i>Contenido</i>	<i>Pág.</i>
<b>III LABORATORIO DE TECNICAS PREDICTIVAS.....</b>	<b>499</b>
<b>Introducción.....</b>	<b>502</b>
<b>13.0</b> Termografía en un departamento de predictivo.....	<b>504</b>
<b>14.0</b> Ultrasonido en un laboratorio de predictivo.....	<b>511</b>
<b>15.0</b> Líquidos penetrantes en un laboratorio de predictivo.....	<b>522</b>
<b>16.0</b> Partículas magnéticas en un laboratorio de predictivo.....	<b>529</b>
<b>17.0</b> Análisis de aceites en un laboratorio de predictivo.....	<b>533</b>
<b>18.0</b> Análisis de vibraciones mecánicas.....	<b>542</b>

## **Introducción**

La importancia de identificar el estado de funcionamiento de un activo e identificar las fallas potenciales que pueden provocar los paros no programados en el mismo, es de vital importancia en los programas de mantenimiento demandados por la industria en la actualidad. Las técnicas de mantenimiento predictivo y los ensayos no destructivos están haciéndose campo en los programas de mantenimiento de aquellas empresas que buscan con afán ser más productivas.

Estadísticamente se tiene que:

- En promedio el 15% al 40%, de los costos de producción son indirectamente del mantenimiento, que en la mayoría de los casos la mitad son innecesarios.
- El 50% del mantenimiento que se aplica en la industria es correctivo, siendo este 10 veces más caro que el mantenimiento predictivo.
- Otro 25% es mantenimiento preventivo, siendo este 5 veces más caro que el mantenimiento predictivo, y que además el 60% de las actividades preventivas realizadas son innecesarias.

Con base a estos datos, podemos identificar grades oportunidades de ahorro en los costos de mantenimiento en la industria en general, a través de la aplicación de las técnicas de mantenimiento predictivo y los ensayos no destructivos tratados en este documento.

La implementación de estas técnicas a los programas de mantenimiento actuales implica una inversión inicial en la adquisición de equipos, instrumentos, materiales, capacitación de personal, en algunos casos software de análisis. El monto de dicha inversión dependerá de la tecnología que se pretende adquirir para cada una de las técnicas, pero por lo general, son equipos que se pagan automáticamente al detectar fallas potenciales que serian catastróficas para la empresa en cuanto a perdidas de producción así como en daños severos en equipos críticos de la planta.

La importancia de un laboratorio de predictivo, pareciera de vital importancia para una empresa de grandes volúmenes de producción, sin embargo lo es para la gran mayoría de empresas sean estas grandes, medianas y pequeñas, la diferencia radica en que muy posiblemente en una empresa pequeña tener un equipo de monitoreo de vibraciones de última tecnología (por poner un ejemplo) estaría subutilizado, pudiendo ser más rentable un equipo básico de monitoreo o una contratación del servicio a una empresa dedicada a ello.

Existe por lo tanto un gran potencial de desarrollo en cuanto al establecimiento de un laboratorio de mantenimiento predictivo que pueda dar este tipo de soporte a la industria y siendo el alma máter la encargada de impulsar el desarrollo a través de estudios y capacitación de personas técnicamente competentes para la industria nacional, es por tanto una oportunidad muy importante desarrollar un laboratorio de estas características dentro de las instalaciones de la Universidad de El Salvador, tanto para poder ofertar este tipo de servicios a la industria, como para capacitar a futuros profesionales y a personal de la industria nacional.

Esta sección pretende establecer los aspectos mínimos pero necesarios en cuanto a equipos e instrumentación para cada técnica desarrollada en este documento, los campos de aplicación de cada una de ellas, las normas y lo referente a capacitación del personal a cargo de este laboratorio.

## 13.0 Termografía en un laboratorio de predictivo

### 13.1 Las aplicaciones de la termografía

#### Aplicaciones eléctricas

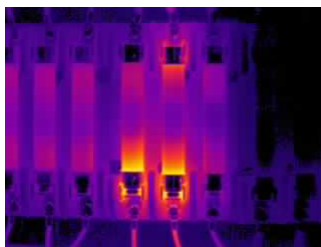
Detectar incrementos de temperatura sin modificar las condiciones de trabajo, es fundamental para poder adelantarse a la avería y de esta manera evitar un posible desastre futuro. Es aquí donde la termografía infrarroja se convierte en un instrumento eficaz en el mantenimiento predictivo y preventivo ya que de una manera rápida y visual el termógrafo podrá determinar el estado de la instalación eléctrica así como el de los componentes que la forman.

Algunas de las aplicaciones de la termografía en el campo eléctrico son

- ☞ Estado de conexiones, bornes y aisladores.
- ☞ Estudio e histórico de transformadores.
- ☞ Estado de bobinados de motores / generadores, Armónicos, Inducciones,
- ☞ Desequilibrio de fases, etc.



Estudios térmicos de transformadores



Estado de conexiones y fusibles



Estado de aisladores eléctricos

Fig. 13-1: aplicaciones eléctricas.

#### Aplicaciones mecánicas

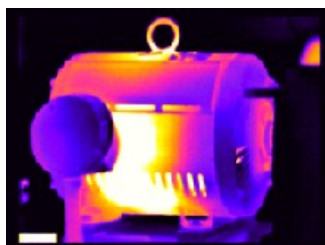
La temperatura en los sistemas mecánicos es de vital importancia, y viene definida por todos los fabricantes de máquinas y herramientas.

Rozamientos, fricciones, malos alineamientos, etc., pueden producir elevadas temperaturas que acorten la vida útil de las máquinas y sistemas de transmisión, o incluso problemas más serios como gripajes o deformación de materiales.

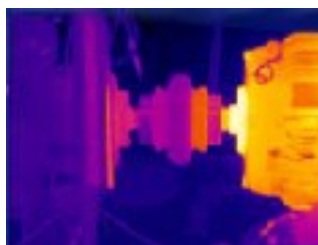
Las principales aplicaciones de la termografía en sistemas mecánicos son:

- ☞ Análisis de motores y generadores.
- ☞ Análisis de rodamientos y poleas.
- ☞ Diagnóstico de estado de cojinetes.
- ☞ Diagnóstico en sistemas de transmisión.

- ☞ Desalineamiento.
- ☞ Estado de los lubricantes.
- ☞ Inspección de soldaduras.



Estudio térmico de máquinas



Análisis de alineamientos

Fig. 13-2: aplicaciones mecánicas.

### **Aplicaciones en procesos**

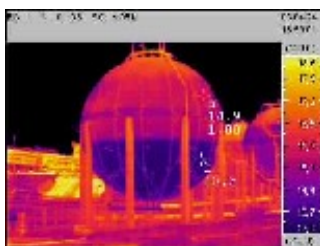
Cambios en las propiedades físicas como son la corrosión, grietas, erosiones, estrechamientos, fugas, bloqueos, etc., causan variaciones detectables en los patrones de energía infrarroja. Se puede aplicar la termografía para detectar anomalías en procesos industriales donde pueden darse algunas de las mencionadas anteriormente

Algunos casos típicos para los que se aplica la termografía son:

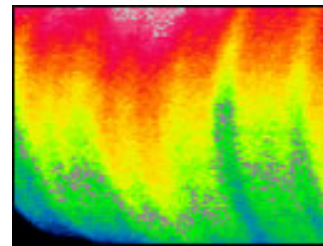
- ☞ Estado y estudio de válvulas
- ☞ Detección de tuberías subterráneas
- ☞ Nivel de líquido de tanques (y sólido).
- ☞ Estudio de refractarios
- ☞ Estudio de pérdidas térmicas
- ☞ Fugas de vapor
- ☞ Pérdidas de vacío.



Pérdidas en válvulas



Tanque de gas



Procesos de fabricación de papel

Fig. 13-3: aplicaciones en procesos.

### **Diagnóstico de problemas en edificios**

Inspecciones en cubiertas

Detección de forma rápida y eficaz zonas en las que el aislamiento esté dañado en cubiertas y azoteas, etc.

Análisis de eficiencia energética

- Análisis de eficiencia energética con las cámaras termográficas en edificios residenciales y comerciales. Aumento en la eficacia del aislamiento térmico de cualquier tipo de edificios detectando zonas de pérdida de calor, exfiltración o infiltración de frío y humedades; se comprueba también el estado del hormigón y localización de los problemas en sistemas de ventilación, calefacción, etc.

## **13.2 Instrumentación**

Una inspección infrarroja, tiene por objetivo, el uso de un equipo detector infrarrojo, para proveer información térmica específica, y la documentación relacionada acerca de la estructura, sistema, objeto o proceso bajo estudio.

Dentro los instrumentos de medición infrarroja, existen desde los más simples que dan un valor de temperatura, hasta las cámaras termográficas que proporcionan una imagen térmica del elemento bajo inspección.

Entre los instrumentos utilizados están:

- ***Termómetro por infrarrojos***



**Fig. 13-4: termómetro infrarrojo.**

Con láser avanzado de clase II y un detector de infrarrojos que aseguran una puntería de precisión para medir la temperatura. El termómetro laser es muy fácil de usar, simplemente se ha de apuntar, apretar el gatillo y leer la temperatura que se muestra en la gran pantalla del equipo. Al no tener contacto con superficies calientes o en movimiento, el termómetro asegura una medición de temperatura más segura, rápida y fácil. Adicionalmente, permite medir la temperatura donde el contacto con una sonda convencional debe evitarse para prevenir la contaminación de la superficie, por lo que este equipo es ideal para su uso en aplicaciones de proceso de alimentos.

- *Cámaras termográficas*

La termografía es un procedimiento de imágenes que hace visible la radiación de calor (luz infrarroja) de un objeto o un cuerpo que es invisible al ojo humano. La termografía es un procedimiento de medición sin contacto, lo que permite registrar procedimientos extremadamente rápidos (explosiones, incendios, etc.) y el transcurso de movimientos. Con la ayuda de la termografía se pueden registrar y esquematizar mediciones de temperatura sobre áreas. Con la termografía se describe la percepción de la emisión de calor de objetos, máquinas, edificios, etc. Gracias a la termografía se puede hacer una idea exacta sobre posibles pérdidas térmicas o determinar fuentes de calor. Un factor esencial para el termograma es el grado de emisión del objeto a investigar. Para la garantía de calidad se está usando cada vez más la termografía en la verificación adecuada del aislamiento en el ramo de la construcción (termografía de construcción). Esto le permite comprobar fallos de construcción de manera eficaz y sin causar daños.

Las cámaras termográficas nos dan un termograma, una representación en una paleta de colores de las diferencias de radiación de los objetos. Como la radiación infrarroja es un parámetro directamente relacionado con la temperatura, una inspección termográfica permite observar las diferencias de temperatura de los materiales. Esta característica nos permite aplicarla en varios ámbitos, por ejemplo en una edificación, ya que las pérdidas de calor y el aislamiento son elementos clave para la eficiencia y el confort de un edificio. Este tipo de cámaras termográficas pueden interesar a constructores, arquitectos, consultores, promotores, a la administración, en definitiva para un sector muy amplio. En una vivienda con las cámaras termográficas se pueden comprobar las zonas frías debido a las fugas de calor e infiltraciones de aire que se producen a través de las uniones entre techos y paredes, donde se rompe la continuidad del aislamiento. También se pueden aplicar las cámaras termográficas para la detección de humedades y daños provocados por el agua, como por ejemplo la comprobación de humedad en un techo, que está provocando el levantamiento del yeso, y que con posterioridad se detecta la existencia de una pequeña fuga en una conducción situada en la cubierta de la estancia en cuestión. Las propiedades térmicas del agua permiten detectar las humedades mediante termografía, sobretodo bajo unas condiciones ambientales determinadas. En definitiva las cámaras termográficas se pueden



## ***Herramientas y técnicas del mantenimiento Predictivo.***

---

aplicar en diferentes ámbitos (comprobación del estado de cubiertas y revestimientos, cálculo de transmisión térmica de superficies, inspecciones de los procesos de secado de materiales como el hormigón o el mortero, funcionamiento del sistema de calefacción y refrigeración, suelos radiantes, evaluación del riesgo eléctrico doméstico) y en todas aquellas aplicaciones en las que detectar diferencias de temperatura nos pueda dar alguna información.

### ***Uso de las cámaras termográficas en el sector industrial.***

Gran cantidad de averías en el sector industrial bien eléctrico, mecánico o de fabricación pueden ser percibidos con anterioridad por cambios en la temperatura los cuales pueden ser detectados gracias a los análisis realizados con las cámaras termográficas bien de instalación fija para un control continuo o bien portátiles para comprobaciones puntuales. La utilización de las cámaras termográficas en el mantenimiento de instalaciones, cuadros eléctricos, maquinaria, etc. hace posible la detección de futuras averías y sus posibles consecuencias.

Existe una gran cantidad de modelos de cámaras termográficas en el mercado hoy en día desde equipos complejos hasta equipos básicos de inspección termográfica, la selección depende de la necesidad, se puede encontrar equipos de las marcas FLIR, FLUKE, SKF, por mencionar algunas.



**Fig. 13-5: cámara termográfica TKTI 10 de SKF**

Los datos a tener en cuenta al adquirir una cámara termográfica que más se adecue a las necesidades son : el número de píxeles, la sensibilidad espectral, la vida útil del sensor, el campo de visión, el rango dinámico, la potencia de entrada, la masa y el volumen.

### **13.3 Las normas**

Las normas internacionales rigen varios aspectos de la termografía profesional (ASNT, ASTM, DIN, ISO):

- ☞ Calificación del Inspector.
- ☞ Requerimientos a los Equipos Termográficos.
- ☞ Procedimiento de Inspección.
- ☞ Clasificación de los Resultados.
- ☞ Contenido del Informe.

#### ***NORMAS ELECTRICAS ISO***

Se rige por las normas de la COMISIÓN ELECTRICA INTERNACIONAL para la evaluación de los defectos encontrados en las rutas de inspección Eléctrica. Para este efecto usa la siguiente terminología:

**Componentes:** Se denomina al elemento del equipo, encontrado con defecto de calentamiento, el cual será identificado con un rectángulo o círculo, mostrando las temperaturas máximas en esa área.

**Adyacente:** Se denomina al elemento del equipo usado como REFERENCIA del componente. La identificación será con el signo “+”.

**Diferencia:** Es la resta de temperatura entre el COMPONENTE y el ADYACENTE.

**Prioridad:** Es catalogar según el nivel de importancia los defectos encontrados, para poder darles un orden de reparación; Para este efecto se usara el siguiente criterio:

**PRIORIDAD RI** Componente  $> 35^{\circ}\text{C}$  Con respecto a su Adyacente. REPARACIÓN INMEDIATA (en las próximas 48hrs).

**PRIORIDAD RPP** Componente  $> 10^{\circ}\text{C}$  y  $< 35^{\circ}\text{C}$  Con respecto a su Adyacente. REPARACIÓN EN PARADA PROGRAMADA, (en los próximos 3 meses).

**PRIORIDAD S** Componente  $< 10^{\circ}\text{C}$  Con respecto a su Adyacente. NO ES NECESARIO REPARAR (se recomienda realizar un seguimiento de temperatura en el equipo) la anterior condición se cumplirá solo si los equipos inspeccionados están a la demanda máxima histórica.

## **13.4 Capacitación**

Certificación de personal de pruebas no destructivas dadas por la American Society of Non destructive Testing (ASNT), la certificación está basada en la experiencia, el entrenamiento y en una serie de exámenes rigurosos.

La certificación es válida por un período de 5 años. Después de 5 años, se requiere una re-certificación que se puede obtener:

- Haciendo el examen nuevamente.
- Demostrar evidencia profesional práctica, capacitación adicional o material publicado en cualquier revista, incluidos los artículos en publicados en INFRAMATION

### **Termografía infrarroja nivel I**

El personal encargado del área de mantenimiento predictivo está preparado para usar las cámaras de termografía infrarroja, con conocimientos en las herramientas para efectuar diagnósticos precisos y mejorar la confiabilidad de la planta.

Posee las bases teórico-prácticas con los cuales puede evitar errores comunes en la medición.

### **Termografía infrarroja nivel II**

Conoce sobre últimas aplicaciones y tecnología más reciente. Reconoce los errores más comunes a la hora de analizar imágenes infrarrojas.

Posee conocimientos más extensos que un termografista de nivel I con conceptos teóricos más amplios. Conoce y aplica las bases para el mantenimiento predictivo con termografía IR (infrarrojo) y está capacitado para desarrollar un programa de inspección con IR.

Se espera que como nivel II prepare a personal Nivel I (ISO 18436-7)

Con sus conocimientos puestos en práctica mejorar el análisis e interpretación de imágenes IR. Una persona calificada nivel II puede ajustar, calibrar equipo para interpretar y evaluar resultados con respecto a códigos y normas.

### **Termografía infrarroja nivel III**

Aparte de cubrir todo lo especificado para los niveles I y II, un termografista nivel III establece técnicas, procedimientos, interpreta códigos, normas y verifica los

procedimientos. El nivel III está capacitado para entrenar y conducir exámenes de certificación nivel I y II.

## **14.0 Ultrasonido en un laboratorio de predictivo**

En el método ultrasónico se utilizan instrumentos que transmiten ondas con ciertos intervalos de frecuencia y se aplican para detectar defectos como poros, fisuras, también para conocer algunas propiedades básicas de líquidos y sólidos.

### **14.1 Las aplicaciones del ultrasonido**

- ☞ Detección y caracterización de discontinuidades.
- ☞ Medición de espesores, extensión y grado de corrosión.
- ☞ Determinación de características físicas.
- ☞ Características de enlace entre materiales.

### **14.2 Instrumentación**

Dentro de los equipos de ultrasonido se encuentran los medidores de espesores y los detectores de fallas en los materiales, por lo que se presentan algunos modelos de estos:

#### **14.2.1 Medidores de espesores**

##### **Modelo: 25DL PLUS**

El medidor de uso general Panametrics-NDT™ cuenta con una pantalla grande de cristal líquido con la función forma de onda en tiempo real y un sofisticado registrador de datos alfanuméricos



**Modelo: 25HP PLUS**

El medidor de velocidad de propagación de la onda sonora y de espesor Panametrics-NDT™ es un instrumento apto para materiales que tienen un gran espesor. Cuenta con una pantalla grande de cristal líquido con la función Forma de onda en tiempo real y un sofisticado registrador de datos alfanuméricos.



**Modelo: 25 Multi Plus**

Este medidor Panametrics-NDT™ está diseñado para la medición de múltiples capas y permite medir simultáneamente hasta cuatro espesores. Cuenta con una pantalla grande de cristal líquido con la función Forma de onda en tiempo real y un sofisticado registrador de datos alfanuméricos.



**Modelo: Magna-Mike 8500**

Utilizado principalmente para los envases de plástico moldeado por soplado y los materiales no ferrosos. Este medidor Panametrics-NDT™ es fácil de usar y su operación se basa en el efecto Hall. Incluye un registrador de datos alfanuméricos



**Modelo: 37DL PLUS**

El medidor de corrosión de avanzada Panametrics-NDT™ cuenta con una pantalla grande de A-scan y un sofisticado registrador de datos alfanuméricos. Sus funciones incluyen la

## ***Herramientas y técnicas del mantenimiento Predictivo.***

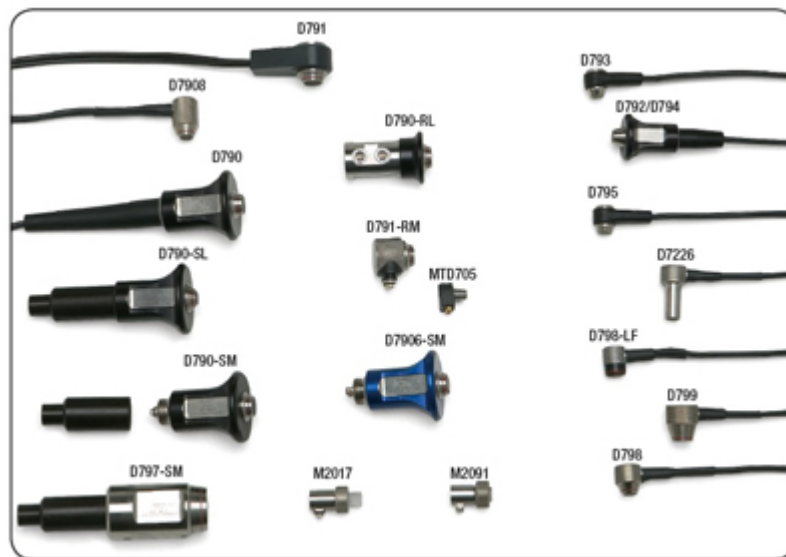
---

tecnología *Thru-Coat*®, la medición eco a eco, la adquisición B-scan, un palpador EMAT y la medición de óxido y/o costras (opcional).



### **Palpadores, Cables, Acopladores y Bloques de Calibración**

Existe una variedad de línea completa de elemento como transductores para el uso con sus calibradores resistentes a la corrosión.



Hay una selección completa de transductores, de cables, de bloques de prueba de calibración, Los transductores del Panametrics-NDT Microscan se utilizan con frecuencia con la serie 25 y las series 35 de calibración.



## 14.2.2 Detectores de fallas portátiles por ultrasonido

### **Modelo: EPOCH XT**

El más reciente detector de fallas Panametrics-NDT™, conforme a la norma IP67, cuenta con una pantalla de cristal líquido de 60 Hz a colores, flexibilidad de la pila, puertos USB, emisor de ondas cuadradas y numerosas opciones.



### **Modelo: EPOCH LT**

Un verdadero detector de fallas portátil, accesible y con numerosas funciones estándares y opciones de software. Esta unidad Panametrics-NDT™ tiene sólo 38 mm de espesor.



### **Modelo: EPOCH 4PLUS**

El modelo EPOCH 4PLUS con pantalla de cristal líquido ofrece más funciones de medición y opciones de software que todos los otros detectores de fallas Panametrics-NDT™.



### **Modelo: EPOCH 4**

El detector de fallas EPOCH 4, además de las funciones estándares, ofrece amplias posibilidades de medición y opciones de software, tal como el B-scan completamente codificado.



**Modelo: EPOCH 4B**

Combina su bajo costo con numerosas funciones prácticas de medición. Este detector de fallas Panametrics-NDT™ ofrece algunas opciones de software.



**Modelo: 1000S / 1000S Series**

Estos detectores de fallas livianos Sonic®, ofrecen, además de las funciones estándares, una alta resolución de pantalla. Su diseño innovador incluyen un teclado súper simplificado y una perilla Smartknob™, lo que hace más simple su operación.



**Modelo: 1200S / 1200S Series**

Estas unidades avanzadas Sonic® ofrecen funciones adicionales de detección de fallas y varias opciones de software. La alta resolución de pantalla y la perilla Smartknob™ son algunas de sus características innovadoras.



**Modelo: 1200M**

El 1200M de Sonic® ha sido diseñado específicamente para cumplir con las exigencias de las Fuerzas Aéreas de los Estados Unidos de Norteamérica. Este detector de fallas por



ultrasonido es digital, liviano, cuenta con una pantalla de cristales líquidos a colores, un teclado sencillo y la perilla Smartknob™ de fácil uso. (NSN: 6635-01-530-7826).



**Modelo: OmniScan MX UT**

Este módulo de la unidad avanzada OmniScan® de R/D Tech® realiza la inspección convencional y automatizada por ultrasonido. Soporta la función TOFD (difracción del tiempo de vuelo), los B-scan y C-scan codificados, así como el almacenamiento completo de datos.



**Modelo: BondMaster**

El BondMaster 1000 de Sonic® es un instrumento para la inspección de materiales compuestos; es liviano, consta de modos múltiples e incluye todas las opciones, entre éstas, la visualización emisión-recepción RF. Es ideal para la inspección de uniones metal sobre metal, grafito sobre Nomex, grafito sobre grafito y metal sobre material alveolar.



## **14.3 Las normas**

### **14.3.1 Normas oficiales mexicanas relacionadas con ultrasonido**

1. NOM-B-011-1987, FEP:1987-09-18, CAN: No Obligatoria

Método de inspección ultrasónica de tubos metálicos

2. NOM-B-012-1987, FEP:1987-09-18

Método de inspección ultrasónica para soldadura longitudinal o helicoidal de tubos soldados

3. NOM-B-049-1988, FEP:1988-05-18

Definiciones de los términos empleados en los métodos de inspección ultrasónica

4. NOM-B-261-1990, FEP:1991-08-01

Método de inspección ultrasónica con haz angular de planchas de acero

5. NOM-B-454-1987, FEP:1987-09-18

Método para el examen ultrasónico para forjas de acero de espesor grueso

6. NOM-B-465-1988, TITFEP:1988-07-11

Inspección ultrasónica por el método de contacto pulso-eco-haz recto

7. NOM-C-275-1986, FEP:1986-11-14

Industria de la construcción - Concreto - Determinación de la velocidad de pulso - Método de ultrasonido

## **14.4 Capacitación**

### **14.4.1 Uso de equipos y medición ultrasónica de espesores**

#### **Descripción:**

Se pretende que el personal obtenga conocimientos generales de los principios y procedimientos del ensayo ultrasónico. Introduce a la técnica ultrasónica y operación de instrumentos para medición de espesores, almacenamiento y manejo de datos.

Contenidos:

<b>1.- Introducción</b>	
<b>2.-</b>	<b>Principios básicos del ultrasonido</b> (Velocidad, frecuencia, Longitud de onda)
<b>3.-</b>	<b>Generación del sonido</b>
	A.- Transductores
	B.- Longitud de onda
<b>4.-</b>	<b>Principio de reflexión</b>
	A.- Interface reflexión
	B.- Geometría del reflector
<b>5.-</b>	<b>Ensayos variables técnicas</b>
	A.- Pulso eco
	B.- Ensayo de geometría
	C.- Opciones por pantalla

<b>6.-</b>	<b>Operación de instrumentos Ultrasónicos</b>	
<b>7.-</b>	<b>Calibración de instrumentos</b>	
<b>8.-</b>	<b>Espesor / Distancia</b>	
	A.-	Técnica con elemento simple
	B.-	Técnica con doble elemento
	C.-	Sonda con línea de retardo
<b>9.-</b>	<b>Almacenamiento y manejo de datos</b>	
<b>10.-</b>	<b>Ejercicios prácticos</b>	
<b>11.-</b>	<b>Revisión</b>	

#### **14.4.2 Ensayos ultrasónicos básicos. Nivel I**

##### **Descripción:**

Curso teórico-práctico con los más nuevos detectores ultrasónicos digitales de fallas que permiten adquirir destrezas en las principales técnicas y procedimientos de ensayo.

##### **Contenidos**

<b>1.-</b>	<b>Introducción NDT</b>	
	A.-	Aplicaciones generales
	B.-	Ventajas y limitaciones
<b>2.-</b>	<b>Principios básicos del ultrasonido (Velocidad, frecuencia, longitud de onda)</b>	
<b>3.-</b>	<b>Generación del ultrasonido</b>	
	A.-	Transductores
	B.-	Forma de onda
	C.-	Campo cercano
	D.-	Extensión del haz
<b>4.-</b>	<b>Principio de reflexión</b>	
<b>5.-</b>	<b>Ensayos de variables técnicas</b>	
	A.-	Método de ensayo básico
	B.-	Técnicas de acoplamiento ( contacto, inmersión )
	C.-	Ensayo de geometría ( haz recto, haz angular )

	D.-	Opciones de pantalla ( A - B - C - Scaning )
<b>6.-</b>	<b>Instrumentos de operación ultrasónica</b>	
<b>7.-</b>	<b>Espesor / medición de distancia</b>	
	A.-	Técnicas de elemento simple
	B.-	Técnicas de elemento doble
<b>8.-</b>	<b>Detección de fallas y evaluación</b>	
	A.-	Distancia compensación de la amplitud
	B.-	Evaluación de discontinuidad
<b>9.-</b>	<b>Teoría y práctica de transductores angulares</b>	
<b>10.-</b>	<b>Teoría y práctica técnica de inmersión</b>	
<b>11.-</b>	<b>Requerimientos de test formal</b>	
<b>12.-</b>	<b>Revisión</b>	

#### **14.4.3 Inspección ultrasónica de soldaduras. Nivel II**

##### **Descripción:**

Curso avanzado de inspección ultrasónica de soldaduras. Contempla ensayos de laboratorio de varios tipos de defectos de soldadura aplicados a la industria e interpretación de resultados de acuerdo a códigos y especificaciones.

##### **Contenidos:**

<b>1.- Introducción</b>		
<b>2.-</b>	<b>Teoría ultrasónica</b>	
	A.-	Operación y evaluación de equipamiento
	B.-	Procedimiento de calibración y ensayo
<b>3.-</b>	<b>Instrumentos accesorios y funciones</b>	
	A.-	Distancia electrónica / compensación amplitud
	B.-	Tiempo y amplitud de las puertas
<b>4.-</b>	<b>Funcionamiento de detectores de fallas</b>	
<b>5.-</b>	<b>Introducción a la soldadura para personal de inspección.</b>	
	A.-	Procesos generales de soldaduras

	B.-	Variaciones geométricas de las soldaduras
	C.-	Tipos y causas de las discontinuidades de soldaduras
<b>6.-</b>	<b>Procedimientos generales de inspección de soldaduras</b>	
	A.-	Definir el problema del ensayo
	B.-	Desarrollo del plan de inspección
	C.-	Seleccionar transductor
	D.-	Revisar instrumento y características de transductores
	E.-	Inspección del metal base
	F.-	Estandarización del haz angular
	G.-	Procedimiento de calibración
	H.-	Técnica de escaneamiento en soldaduras
	I.-	Evaluación de discontinuidades
	J.-	Localización de la discontinuidad, dimensión, caracterización
	K.-	Modalidad de informe
<b>7.-</b>	<b>Inspección de soldaduras según requerimiento de códigos.</b>	
	A.-	Procedimiento ASME
	B.-	Procedimiento AWS
	C.-	Procedimiento API
<b>8.-</b>	<b>Desarrollo de procedimientos generales.</b>	
<b>9.-</b>	<b>Revisión</b>	

#### **14.4.4 Detección ultrasónica avanzada y tamaño**

**Descripción:**

El curso de detección avanzada y tamaño con ultrasonido permite al estudiante aprender la técnica para la detección de fallas en materiales susceptibles a tensión de corrosión, grietas y otras formas de fallas por fatiga. El curso incluye amplitud y longitud de la onda, técnica para detección, caracterización, tamaño de grietas por tensión de corrosión granular e intergranular y tipos de grietas por fatiga. Este curso está diseñado para personal con conocimiento en ultrasonido y que desarrollan gerencia en ensayos no destructivos (NDT).

**Contenidos:**

<b>1.- Revisión teoría ultrasónica y aplicaciones</b>		
	A.-	Revisión de los fundamentos físicos del ultrasonido
	B.-	Teoría UT
	C.-	Calibración básica UT según ASME
<b>2.- Código ASME, equipamiento y consideraciones de calibración.</b>		
	A.-	Preparación de soldadura
	B.-	Geometría de la raíz de la unión soldada
	C.-	Revisión de la unión soldada
<b>3.- Detección de fallas y técnicas de evaluación</b>		
	A.-	Caracterización de defectos
	B.-	Caracterización señal e identificación; dinámica del eco, altura, tiempo de caída, duración del pulso.
<b>4.- Revisión de la teoría del tamaño y aplicaciones</b>		
	A.-	Teoría de inspección del tamaño y aplicaciones
	B.-	Interpretación de ondas físicas para su identificación
	C.-	Envolvente de la indicación
	D.-	Doble modalidad y técnica de difracción
<b>5.- Revisión de la teoría del tamaño y aplicación</b>		
	A.-	Demostración de calibración
	B.-	Indicaciones de espuras y no relevantes

## **15.0 Líquidos penetrantes en un laboratorio de predictivo**

### **15.1 Las aplicaciones de los líquidos penetrantes**

Las aplicaciones de los líquidos penetrantes son amplias y por su gran versatilidad se utilizan desde la inspección de piezas críticas, como son los componentes aeronáuticos; Muchas de las aplicaciones descritas son sobre metales como hierro fundido, acero, acero inoxidable, pero esto no es una limitante, ya que se pueden inspeccionar otros materiales tanto en materiales ferrosos y no ferrosos, por ejemplo cerámicos vidriados, plásticos, porcelanas, recubrimientos electroquímicos, aluminio, magnesio, cobre, latón, carburos, estelitas, cerámica y algunos plásticos. etc.

La inspección por líquidos penetrantes es empleada para detectar e indicar discontinuidades que afloran a la superficie de los materiales examinados; busca de grietas superficiales o subsuperficiales en piezas.

#### **Principales aplicaciones.**

- ☞ Detección o análisis en superficies con grietas, poros y otras discontinuidades prácticamente cualquier material no poroso, tanto en materiales ferroso como no ferrosos ejemplos:
  - ☞ En cremalleras.
  - ☞ Engranajes.
  - ☞ Catarinas.
  - ☞ Barras de torsión.
  - ☞ Ejes.
  - ☞ Ganchos de grúa.
  - ☞ Bombas.
  - ☞ Soldaduras.
  - ☞ Inspección de recipientes a presión.
  - ☞ Pruebas de fugas.
  - ☞ Mantenimiento de aviones.
  - ☞ Mantenimiento naval y marítimo.

- ☞ Oleoductos de petróleo.
- ☞ Pruebas en intercambiadores de calor.
- ☞ Inspección y prueba de soportes de amortiguadores y hojas de resorte.

## 15.2 Instrumentación



Fig. 15-1: Líquidos penetrantes SK416 Spotcheck (Líquidos para inspección) de la marca magnaflux Kit con 4 piezas en aerosol de 16 oz / 300 grs. En estuche de plástico.

Incluye:

2 Limpiador / Removedor SKC-S, 1 Penetrante SKL-SP1, 1 Revelador SKD-S2, 1 Marcador para metales, Toallitas húmedas Scrub y Una Fanela

Básicamente el equipo suficiente y necesario para realizar la prueba ya sea en el laboratorio o en sitio es un conjunto de tres espray; el Limpiador, el Penetrante y el revelador. A este conjunto se le conoce también como un ensayo rojo visible esto por ser el color característico del penetrante.

Se pueden adquirir estos materiales en mayor cantidad encontrándose en presentaciones como:

Líquido Penetrante base Agua SKL-4C Spotcheck (Líquido para inspección)

### Características y uso:

- ☞ Penetrante base agua.
- ☞ Lavable con agua.
- ☞ Color rojo a la luz del día y fluorescente naranja con uso de luz ultravioleta (Esta se usa si se desea mayor sensibilidad ver Fig. 4-25 del capítulo I).





Fig. 15-2: Cubeta de Líquido Penetrante en presentación de 5 Galones / 19 Lts.

En presentaciones similares esta si se desea un penetrante fluorescente.

El revelador se puede obtener en el mercado en otra presentación:

La presentación es en polvo y fluorescente en polvo ZP-4B Zyglo (Polvo Desarrollador) en caja de 10 Lbs / 4.5 Kg siempre en la marca Magnuflex.



Fig. 15-3: Banco de para realizar ensayos de líquidos Penetrantes (Cuba) en un laboratorio.

### **15.3 Las normas**

#### **☞ PARA EL ENSAYO.**

Se apoya en Código ASME, sección V (1992). Artículo 6, “Inspección por medio de líquidos penetrantes” y Art. 24 “Estándares para la inspección de líquidos penetrante. El código tiene los métodos de prueba no destructiva de

materiales para detectar las irregularidades de los materiales, soldaduras y los accesorios fabricados.

- ☞ **MIL-STD 6866** Norma militar para ensayos con líquidos penetrantes.
- ☞ **DIN 54 152** Parte 1 Procedimiento de Inspección con penetrantes.
- ☞ **DIN 54 152** Parte 2 Inspección con penetrantes. Verificación de materiales penetrantes de inspección.
- ☞ **ASTM E1417** Práctica para examinar con líquidos penetrantes.

### ☞ **PARA LA SEGURIDAD.**

De todos los consumibles en el ensayo de líquidos penetrantes los tres elementos como son el limpiador, el penetrante y el revelador es necesario conocer algunas normas de seguridad en su manejo y almacenamiento para evitar accidentes.

#### **El Limpiador.**

##### GENERALIDADES PARA URGENCIAS

El material a granel es un combustible líquido. En altas concentraciones, el vapor irrita los ojos y el tracto respiratorio. El aerosol es inflamable.

##### CONSECUENCIAS POTENCIALES PARA LA SALUD

Contacto: Puede producir irritación al eliminar aceites naturales de la piel debido a exposiciones largas o repetidas con la piel:

Ojos: Posiblemente irritante.

Inhalación: Provoca mareos y náuseas.

Ingestión: Insignificantes en cantidades pequeñas (trago o bocado).

Enfermedades que pueden agravarse por exposición al producto: Ninguna

##### PRIMEROS AUXILIOS

Contacto con la piel: Lavar bien con agua y jabón. Usar loción balsámica.

Ojos: Enjuagar con abundante agua debajo de los párpados superiores e inferiores.

Inhalación: En caso de mareos o náuseas, llevar a la persona afuera para que tome aire fresco.

Ingestión: No inducir el vómito. La ingestión accidental de un bocado o trago no debería causar daños significativos.

#### RIESGOS DE INCENDIO

Condiciones de inflamabilidad:

***A granel:*** Fuentes de combustión pueden encenderlo.

***Aerosol:*** Si se asperja cerca de llamas, el rocío se encenderá.

Punto de inflamabilidad: Mín. 54°C (130°F) (punto de inflamabilidad en cubo cerrado Pensky-Martens).

Límites de inflamabilidad en el aire: Entre 1% y 9%

Medios extintores: Dióxido de carbono, espuma, productos químicos secos.

Procedimientos extintores especiales: Mantener frescos los contenedores por medio de aspersión de agua. No rociar agua directamente sobre el limpiador en combustión, ya que flotará y hará que las llamas se esparzan.

***Productos peligrosos de la combustión:*** Humo, hollín, óxidos de carbono.

***Riesgos inusuales de incendio:*** Los envases de aerosoles pueden explotar si se los expone a temperaturas superiores a los 54°C (130°F) y crear un incendio mediante la aspersión de su contenido.

#### MEDIDAS PARA EMISIONES ACCIDENTALES

En caso de derrame secar o limpiar con material absorbente. Evitar el contacto con el material derramado o liberado. Quitar inmediatamente todas las prendas contaminadas.

#### **El penetrante.**

##### GENERALIDADES PARA EMERGENCIAS

Líquido y aerosol inflamables. El vapor puede producir fogonazos. Nocivo o fatal si es ingerido. El rocío o vapor puede producir irritaciones en el tracto respiratorio. El contacto con el líquido puede provocar irritación en los ojos y en la piel. La sobreexposición puede provocar depresión del Sistema Nervioso Central (SNC) y afectar los órganos. Los derrames pueden implicar riesgo de caídas.

##### EFFECTOS POSIBLES PARA LA SALUD

Contacto con la piel: Puede irritar la piel al remover los aceites naturales en largas o repetidas exposiciones.

Ojos: Irritación.

Inhalación: Sin importancia

Ingestión: Sin importancia en cantidades pequeñas (un trago).

Condiciones médicas conocidas que sean graves por la exposición al producto:

Ninguna

#### **PRIMEROS AUXILIOS**

Contacto con la piel: Lavar con jabón y agua. Use loción tranquilizante.

Ojos: Enjuague cuidadosamente arriba y debajo de los párpados usando abundante agua. Inhalación: No se aplica.

Ingestión: No provoque vómito. La ingestión accidental de un pequeño trago no se espera que cause un daño importante.

#### **RIESGOS DE INCENDIO**

***Condiciones de flamabilidad:*** Ninguna.

***Punto de inflamación:*** Ninguna.

***Límites flamables en el aire:*** Ninguna.

***Medios de extinción:*** No se aplica.

***Procedimientos especiales para combatir el fuego:*** Ninguno.

***Residuos peligrosos al incendiarse:*** Humo, hollín, óxido de carbono si estalla un incendio.

***Riesgos poco usuales de incendio:*** Ninguno.

#### **MEDIDAS PARA FUGAS ACCIDENTALES**

Limpiar o barrer con absorbentes.

#### **MANEJO Y ALMACENAJE**

Evite respirar la brisa.

Evite el contacto repetido o prolongado.

#### **Revelador.**

##### **GENERALIDADES PARA URGENCIAS**

Aerosol y líquido blanco sumamente inflamables. En lugares sin ventilación, los vapores de rápida evaporación pueden alcanzar niveles peligrosos en poco tiempo.

## **15.4 Capacitación**

El personal en esta área debe adiestrarse con cursos de Líquidos penetrantes Nivel I. El objetivo del curso es capacitar al participante en la teoría y práctica de la técnica de LP, sus alcances, ventajas y limitaciones, las variantes de la técnica.

También está el curso de Líquidos penetrantes Nivel II. El objetivo de este otro curso es capacitar al participante en los métodos de inspección específicos de la técnica y los procedimientos de inspección aceptados por los códigos y las normas.

En un laboratorio el procedimiento debe ser realizado por: Un inspector nivel I como mínimo, en líquidos penetrantes quien será el responsable de realizar las etapas hasta el registro de resultados si no se puede tener a un inspector nivel II.

La persona que realice los ensayos de líquidos penetrantes es imprescindible demostrar conocimiento y experiencia en la técnica de líquidos penetrantes y contar con ideas en temas de calidad si el laboratorio trabajara para la industria, pues debe tener bases para diagnosticar posibles influencias de ésta en los materiales y poder sugerir mejoras. De ser posible poseer certificación END nivel II, esto con la idea de poder desarrollar guías para su seguimiento en un determinado proceso en los que no baste lo que ya está escrito en las normas quien interpretará los resultados obtenidos.

También porque si cuenta con certificación nivel dos puede ser un buen candidato para ser el responsable de las actividades de inspección que desarrolle el Laboratorio de Ensayos en esta técnica.

## 16.0 Partículas magnéticas en un laboratorio de predictivo

### 16.1 Las aplicaciones las partículas magnéticas

Los materiales ferromagnéticos tales como muchos aceros desarrollan, cuando son magnetizados, un flujo magnético mucho mayor que en los materiales no magnéticos.

Si existiera un defecto cerca de la superficie se produce un escape de este flujo, llamado *campo de fuga*, en el espacio cercano a la superficie de la pieza como se muestra en la Fig. 16-1.

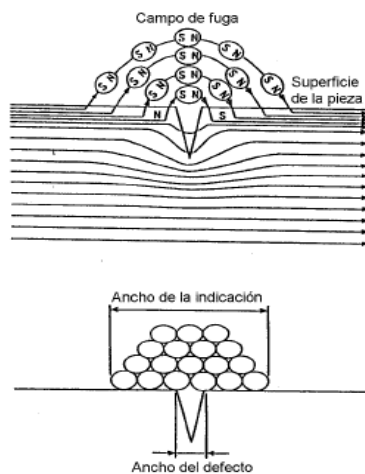


Fig. 16-1: Campos de fuga en la superficie de la pieza inspeccionada.

El ensayo por partículas magnetizables es el método más útil de inspección para determinar si hay defectos superficiales y/o subsuperficiales en el objeto.

Es posible detectar con bastante seguridad discontinuidades de un milímetro de longitud, por lo que ha sido ampliamente usado en aceros. Desafortunadamente no es posible estimar la profundidad de las indicaciones que es la información más importante cuando se quiere evaluar la vida de un material.

## 16.2 Instrumentación

### *Tipo de Partículas Magnetizables*

- ☞ Visibles
- ☞ Fluorescentes

Se pueden utilizar partículas magnetizables disponibles como:

- Concentrados de polvos fluorescentes y no fluorescentes (visibles) preparados o para preparar suspensiones en agua o destilados livianos de petróleo.

- Polvos secos fluorescentes y no fluorescentes (visibles) listos para usar.

La concentración de las partículas por vía húmeda se deberá controlar diariamente.

Los vehículos de la suspensión para el método húmedo serán de un destilado de petróleo liviano (por ejemplo kerosén), o agua acondicionada convenientemente. Los vehículos de la suspensión tendrán un punto de inflamación igual o mayor a 60 ° C. La concentración y la contaminación se deberán controlar al comenzar el ensayo, cada ocho (8) horas de trabajo o cuando se ajuste o cambie el baño.

La selección de un tipo específico de equipo depende de la aplicación requerida, el tipo y magnitud de la corriente de magnetización necesaria y el nivel de productividad. Los equipos empleados se deben mantener correctamente y calibrar periódicamente cada año o cuando se sospecha que el funcionamiento es incorrecto.

A menos que se especifique lo contrario, nunca se deberá utilizar imanes permanentes.

***Partículas Magnéticas Fluorescentes*** (requieren un luz negra) se utilizan para la inspección de partículas magnéticas en el método de detección de las grietas superficiales y subsuperficiales en materiales ferrosos. Cada producto puede ser utilizado por vía húmeda o seca.



Fig. 16-2: Partículas magnetizables fluorescente.

***Vehículo (derivado del petróleo):*** Es de utilización cuando se emplean partículas húmedas, entre las características que deben poseer están: sin olor, baja viscosidad, alto punto de inflamación.

***Vehículo (agua):*** existen diferentes características para este tipo de vehículo de las partículas magnetizables:

**Inhibidor de corrosión:** Amarillo líquido inhibidor de corrosión.

**Agente humectante:** Blanco granular agente humectante y Antiespumante.

***Yugo Magnético:*** Es la herramienta que permite magnetizar la superficie de la pieza a inspeccionar de manera que genera un campo magnético tal que oriente las partículas esparcidas en la superficie indicando la ubicación y la forma de la discontinuidad del material.



**Fig. 16-3: Yugo magnético y accesorios.**

***Lámpara de luz Negra:*** Es de utilidad cuando se emplean partículas magnetizables fluorescentes, que no son perceptibles en la luz normal.



**Fig. 16-4: Lámpara de luz negra.**

## **16.3 Las normas**

- ☞ La ASNDT (*American Society for Non-Destructive Testing*) es el ente internacional que rige los procedimientos y normas para la aplicación de los ensayos no destructivos.
- ☞ ASTM E 709-80: Describe la técnica para la prueba de partículas magnéticas secas y mojadas, un método no destructivo para detectar las grietas en materiales ferromagnéticos.
- ☞ ASME E-144: Indica los requisitos mínimos que deben cumplir las partículas magnetizables y bajo qué condiciones son aplicables cada una de ellas.



## **16.4 Capacitación**

Con la implementación de la Norma ISO 9712 a partir del año 1993 se tiende a unificar internacionalmente los criterios de calificación y certificación de personal en ensayos no destructivos, produciéndose cambios y adaptaciones de los diferentes sistemas hasta ese momento utilizados, por ejemplo ASNT crea el sistema de calificación central.

Una persona capacitada con nivel I de debe ser capaz de:

- a) preparar los equipos – b) realizar los ensayos – c) registrar y clasificar los resultados de acuerdo con un criterio documentado – d) informar los resultados.

## **17.0 Análisis de aceites en un laboratorio de predictivo**

### **17.1 Las aplicaciones del análisis de aceite**

El análisis de aceite es una de las técnicas simples, que mayor información proporciona al administrador de mantenimiento, con respecto a las condiciones de operación del equipo, sus niveles de contaminación, degradación y finalmente su desgaste y vida útil.

Muchos departamentos de mantenimiento tienen actualmente programas de análisis de aceite. Algunos utilizando el laboratorio de su proveedor de lubricantes o contratando los servicios de laboratorio privados. En muchos de los casos los resultados del análisis, son recibidos semanas o meses después de la toma de la muestra y la información se vuelve irrelevante, ya que para ese momento, las condiciones del equipo ya son diferentes, en muchos casos el aceite ya fue cambiado y en otros el equipo ya falló y fue reparado.

Un programa de análisis de aceite puede convertirse en un derroche innecesario de tiempo y recursos si no está bien establecido. En muchos de los casos, se convierten en programas de "puro nombre". Los departamentos de mantenimiento conservan grandes cantidades de papel en archivos y expedientes, de reportes con los resultados de los análisis, recibidos fuera de tiempo (que en ocasiones no han sido revisados) y que contienen valiosa información esperando a ser analizada y explotado su potencial.

La aplicación del análisis de aceite se presta para un mantenimiento predictivo combinado con un proactivo, para conocer las causas que generan el desgaste y tomar las decisiones de control antes de que estas dañen el equipo, el mantenimiento predictivo se enfoca al monitoreo *de las causas que originan la falla*. Este enfoque hace la diferencia en la ampliación de la vida de la maquinaria.

Algunas de las fallas que el análisis de aceite puede ayudar a detectar:

- ☞ Partículas abrasivas en el aceite.
- ☞ Aceite contaminado con Agua, combustibles, Productos químicos.
- ☞ Operación en alta temperatura.
- ☞ Desalineamiento.
- ☞ Desbalanceo.

- ☞ Cavitación.
- ☞ Fatiga.
- ☞ Sobrecarga.
- ☞ Agotamiento de aditivos.
- ☞ Aceite aplicado erróneamente.
- ☞ Inicio de falla en cojinetes.
- ☞ Inicio de falla en rodamientos.
- ☞ Inicio de fallas progresivas.

La tabla siguiente nos muestra algunas pruebas del análisis de aceite y su enfoque:

<b>Análisis de Aceite</b>	<b>Objetivo</b>	<b>Resultado esperado</b>
<b>Viscosidad</b>	Salud del lubricante	Estable
<b>Número de Neutralización (AN y BN)</b>	Degradación del lubricante	Tendencia decreciente lenta
<b>Punto de inflamación</b>	Contaminación	Estable
<b>Análisis de elementos por emisión atómica</b>	Degradación de aditivos Contaminación Metales de Desgaste	Decremento suave Negativo Negativo – Tendencia suave
<b>FTIR – Análisis infrarrojo</b>	Degradación de aditivos Contaminación	Decremento suave Negativo
<b>Conteo de partículas</b>	Contaminación y/o desgaste	Estable en la meta establecida
<b>Análisis de humedad</b>	Contaminación	Negativo
<b>Densidad ferrosa o partículas ferrosas</b>	Desgaste	Decremento o Estable
<b>Ferrografía analítica</b>	Localización del tipo de desgaste presente	Identificación del tipo de desgaste, procedencia y causa
<b>Resistencia a la oxidación RPVOT</b>	Salud del lubricante	Estable
<b>Pruebas de membrana y gota</b>	Salud del lubricante Contaminación Desgaste	Conservación de aditivos Negativo Negativo - Estable

Un análisis de aceite debe incluir como mínimo:

- Recuento de partículas según el código ISO 4406/2000.
- Viscosidad medida en centistokes.
- Contenido de agua en ppm.
- Nivel de acidez, TAN (Total Acid Number).

Todos estos factores pueden influir en la fiabilidad y vida útil de la máquina y componentes.

La selección de un laboratorio de análisis de aceite es un proceso que implica muchas consideraciones diferentes. No existen dos laboratorios exactamente iguales y varían de manera significativamente de muchas maneras. Actualmente son pocas las entidades que prestan servicios de acreditación para laboratorios de aceite en uso, lo cual significa que el usuario debe pasar por el proceso de evaluar sus opciones con instrucciones limitadas. Esto puede ser tan complicado que la mayoría de los usuarios se guían por las promesas y el precio para la toma de decisiones.

Usualmente es mejor comenzar con una descripción detallada de las tareas que deberá realizar el laboratorio. Mientras más detallado y específico sea el alcance del trabajo, mayor será la satisfacción de los usuarios con el servicio. No deje nada al azar. Deberá detallar varios requerimientos específicos. En seguida, se mencionan algunos de los puntos a considerar al seleccionar un laboratorio:

### **Ubicación**

¿Dónde debe estar ubicado el laboratorio? Muchas empresas prefieren que el laboratorio esté cerca geográficamente de su planta para poder repetir alguna muestra si fuese necesario. Sin embargo, puede ser igualmente eficiente enviar muestras urgentes de un lado a otro del país que mandarlas al otro lado de la ciudad. Existen ciertos beneficios de tener el laboratorio en la misma zona horaria cuando surgen dudas. Sin embargo, para la mayoría de los usuarios, la ubicación del laboratorio es relativamente baja en la lista de prioridades para la selección del laboratorio.

### **Sector de la industria**

Muchos laboratorios se especializan en ciertas industrias o segmentos de industria. Por ejemplo, hay laboratorios que se especializan en locomoción, aviación, camiones, todo terreno, plantas de energía nuclear, equipo rotativo, sistemas hidráulicos e industria del acero. La mayoría de los laboratorios promocionan tener capacidad de servicio completo en general, pero una revisión más profunda podría revelar un área de especialidad diferente.

### **Tiempo de respuesta**

Una falla que se detecta demasiado tarde no puede ser corregida a tiempo para salvar la máquina. Por lo tanto es importante que el laboratorio se comprometa a entregar resultados en un tiempo de respuesta razonable de acuerdo con el requerimiento del cliente. El compromiso de tiempo de respuesta del laboratorio con frecuencia se refleja en el precio. No es inusual que un laboratorio que garantiza tiempos de respuesta de 48 horas en muestras de rutina, cobre considerablemente más que un laboratorio que no ofrece esa garantía. Puede que se requiera en ocasiones que el laboratorio tenga tiempos de respuesta de 24 horas para muestras excepcionales.

### **Capacidades de prueba**

Hay grandes diferencias entre unos laboratorios y otros en relación con su capacidad. Algunos laboratorios ofrecen un amplio rango de capacidad en pruebas ASTM mientras que otros se limitan a un reducido grupo de pruebas diseñadas para satisfacer al técnico de mantenimiento preocupado con la contabilidad del equipo y la salud de los aceites lubricantes. Refiérase al conjunto de pruebas recomendadas, descrita con anterioridad para asegurarse de que el laboratorio puede cubrir los requerimientos mínimos.

### **Flexibilidad en pruebas**

Muchos laboratorios no permiten al cliente diseñar sus propios grupos de pruebas por tipo de máquina. Tampoco permiten tener flexibilidad en relación con pruebas excepcionales. Puede ser necesario contar con un laboratorio flexible con el fin de desarrollar grupos de pruebas apropiados para pruebas de rutina o excepcionales.

### **Objetivos y límites**

Ciertos laboratorios permiten al cliente establecer límites para su equipo, otros no. Pretender que un cliente se ajuste a rígidos límites establecidos puede impactar negativamente la efectividad general del programa de análisis de aceite.

### **Estilo del reporte**

El reporte de análisis de aceite precisa ajustarse a las necesidades del cliente. Debería tener ambas formas de presentación (tabular y gráfico) de información del análisis de aceite. Además, los límites y objetivos establecidos por el cliente deben estar visibles en el reporte. Por último, la línea de base del aceite nuevo debe mostrarse junto a la información del aceite en uso.

### **Aseguramiento de calidad**

La precisión de las pruebas es una de las quejas más comunes que tienen los clientes acerca de los servicios ofrecidos por laboratorios comerciales de análisis de aceite. Actualmente, no hay un control independiente o verificación de la calidad del análisis de aceite en uso. Tampoco existe una organización de certificación para laboratorios de análisis de aceite en uso. Por tanto, es importante investigar qué es lo que hace el laboratorio para tener un control interno. Aquí hay algunas preguntas que debe hacer:

- ¿El laboratorio tiene certificación ISO 9002?
- ¿Realiza diariamente verificación de la calibración de sus instrumentos?
- ¿El laboratorio procesa muestras de control ciegas para evaluar precisión y desempeño?
- ¿Se mantienen gráficas de control para cada instrumento mostrando su frecuencia de prueba y precisión de las pruebas de calibración?
- ¿Cuáles son los procedimientos de aseguramiento de calidad establecidos por el laboratorio para tener un control propio de calidad?
- ¿Se les pide a los técnicos del laboratorio recibir entrenamiento constante de actualización para mantener su nivel de capacidad y evitar ‘caer’ en prácticas mediocres?

### **Servicio electrónico de información**

Los programas modernos de análisis de aceite generalmente son libres de papel. Es mucho más eficiente invertir el tiempo en la solución de problemas y análisis de información solo de las máquinas con resultados anormales. Existen sofisticados programas de software para análisis de aceite disponibles comercialmente, que tienen interfaz con los servicios de laboratorios comerciales.

### **Precio**

Esta debe ser la última consideración y la de menos importancia en la selección del laboratorio. Los servicios de análisis de aceite no son un producto de consumo, al igual que los servicios de un cardiólogo no deben considerarse como tal. La calidad y efectividad de los servicios de análisis de aceite tendrán una influencia en la efectividad de todo el programa y de los beneficios que se reciban. El cliente debe estar consciente de que deberá pagar un precio justo por servicios de laboratorio puntuales y de alta calidad.

### **Proceso final de selección**

Una vez que se han creado los objetivos de trabajo, se utiliza el proceso descrito enseguida para hacer la selección final:

- Enviar la solicitud a concurso a varios laboratorios que pudiesen cumplir con los requisitos.
- Entrevistar (por teléfono) a los laboratorios que entreguen las propuestas más aceptables.
- Seleccionar los dos o tres mejores laboratorios y pídale que envíen referencias.
- Seleccionar la mejor opción y una alternativa.
- Visitar su mejor opción para ver cómo opera y para que conozca a la gente. Si es aceptable, conceda el contrato a este laboratorio.

## **17.2 Instrumentación**

En los últimos cinco años, la cantidad de instrumentos de análisis de aceites en sitio ha crecido en número y se ha reducido en tamaño y sofisticación, permitiendo que esta técnica pueda realmente proporcionar al profesional del mantenimiento la información necesaria para controlar las causas que ocasionan la falla de sus equipos y además poder monitorear el progreso de fallas no tribológicas.



***El controlador de aceite SKF TMEH 1:*** Mide los cambios en la constante dieléctrica de un aceite. Por comparación de las mediciones obtenidas con un mismo aceite nuevo y usado (misma marca y características), es capaz de determinar el grado del cambio sufrido por

la constante dieléctrica del aceite. El cambio dieléctrico está directamente relacionado con la degradación y el nivel de contaminación del aceite y permitirá al usuario conocer los intervalos óptimos para el cambio del aceite, así como detectar aumentos en el desgaste mecánico y pérdida de propiedades lubricantes del aceite. Para facilitar el control de tendencia de los análisis, el instrumento muestra lecturas numéricas. No es un instrumento analítico en sí, es sólo un equipo que detecta solamente los cambios del estado del aceite. Las lecturas visuales y numéricas que indica el equipo son sólo una guía para realizar la tendencia de las lecturas comparativas de un aceite nuevo y usado del mismo tipo y marca. No hay que fiarse únicamente de las lecturas numéricas.

***El SKF TMVM 1:*** es un viscosímetro rotacional portátil que mide de forma rápida y fiable la viscosidad de los aceites lubricantes y fluidos hidráulicos. Es adecuado tanto para mediciones cuantitativas como cualitativas. El TMVM



1 es un equipo adecuado para hacer una primera comprobación midiendo en sitio. Comprobando regularmente la viscosidad de los aceites se obtiene información puntual sobre el estado de los mismos, lo que puede afectar la lubricación y el rendimiento de la máquina. Su diseño compacto y ligero y su portabilidad hacen que sea un equipo esencial para empresas de servicio y operarios de mantenimiento.

Estos son solo algunos de los instrumentos básicos que pueden encontrarse para realizar análisis de aceites y depende del uso y las interpretaciones adecuadas por los técnicos en el análisis para hacer de ellos herramientas valiosas de monitoreo de la condición de los equipos.



## 17.3 Las normas

- ☞ Contaje de partículas ISO 4406
- ☞ Análisis Espectrométrico ASTM D5185
- ☞ Índice de Acidez ASTM D664
- ☞ Viscosidad Cinemática @40°C ASTM D445
- ☞ Reserva Alcalina ASTM D1121
- ☞ Paquete de aditivos. ASTM-D 5185//ASTM D4951- (PdMA)
- ☞ Sólidos en Volumen-ASTM D1796 (RM)
- ☞ Número de neutralización. TAN-ASTM-974 (PdMA)

## 17.4 Capacitación

Actualmente organizaciones no lucrativas como el ICML (International Council for Machinery Lubrication) [www.lubecouncil.org](http://www.lubecouncil.org) ofrecen tres tipos de certificaciones de validez Internacional a profesionales que tienen los conocimientos y la experiencia para aplicar la técnica del análisis de aceites para el monitoreo de condición de maquinaria, su adecuada lubricación y la ejecución correcta de las pruebas del análisis de aceite. Un especialista certificado en análisis de aceite garantiza una interpretación correcta de la información y puede establecer recomendaciones que no sólo incrementan la confiabilidad de la maquinaria sino que ayudan a ampliar su vida.

### 17.4.1 Curso básico de análisis de aceite

1. Introducción.
2. Estrategias de Mantenimiento.
3. Aplicaciones del análisis de lubricantes.
4. Lubricación-Fundamentos-Métodos.
5. Lubricantes-Clasificación-Propiedades.

6. Lubricación de equipos-Reductores-Rodamientos-Cojinetes-Cadenas.
7. Programa de Monitoreo de Equipos por Análisis de Lubricantes. Alarmas-Muestreo-Beneficio Económico.
8. Contaminación-Contaminantes.
9. Conteo de Partículas-Código de limpieza ISO 4406.
10. Análisis microscópico de partículas-Modos de desgaste.
11. Caso tipo-Monitoreo de un cojinete-condición de funcionamiento severa-inspección-conclusión

#### **17.4.2 Aplicación del programa de mantenimiento análisis de aceite**

1. Introducción.
2. Aplicación de los análisis de Lubricantes.
3. Importancia del control de recepción de partidas de Lubricantes.
4. Aplicación del programa de monitoreo de equipos por análisis de lubricantes.
5. Técnicas de muestreo-punto de extracción óptimo para cada sistema.
6. Período de muestreo óptimo.
7. Paquetes de ensayos.
8. Alarmas-tendencias-condición de funcionamiento.
9. Informes -acción recomendada-interpretación de los resultados de los ensayos.
10. Referencias.

## **18.0 Análisis de vibraciones mecánicas**

### **18.1 Las aplicaciones del análisis de vibraciones mecánicas.**

El mayor desarrollo en la aplicación del análisis de vibraciones es indiscutiblemente en el campo del monitoreo de maquinaria rotativa, aunque existen otras aplicaciones.

Todas las maquinas vibran algunas más que otras, pero cuando estas vibraciones sobrepasan el nivel de vibración aceptable para cada máquina, es muy probable que exista un daño en algún elemento de la misma.

Los problemas más comunes en maquinaria rotativa y de fácil detección a través del monitoreo y análisis de vibraciones mecánicas es el desbalanceo y desalineación, ambos problemas suman cerca del 80% de las fallas en estos equipos.

La monitorización de los parámetros de vibración permiten identificar además de los ya mencionados, daños en los rodamientos, engranes, problemas de lubricación, problemas eléctricos en motores, cavitación en bombas, entre otros que son dañinos para los propósitos de productividad de la industria nacional y mundial.

Los encargados de mantenimiento en planteles industriales tienen el reto de mantener su maquinaria trabajando eficientemente y con periodos de tiempo más prolongados, reduciendo además los costos de mantenimiento. Esta es una tarea muy difícil, cuando no se conoce el estado de funcionamiento de nuestra maquinaria estando expuestos a que sin previo aviso una maquina se pare por algún daño, deteniendo la producción con pérdidas cuantiosas para la empresa.

Las técnicas, los equipos y herramientas adecuadas y un personal calificado permiten el desarrollo de programas de mantenimiento predictivos, orientados a la reducción de paros no programados y mantener la maquinaria trabajando eficientemente conociendo el estado de funcionamiento de la máquina.

De todas las técnicas de mantenimiento predictivo existentes hasta hora, el monitoreo y análisis de vibraciones mecánicas, es la técnica que permite identificar la mayor cantidad de fallas potenciales en las máquinas, por ello es utilizada como la base del mantenimiento predictivo, apoyándose en algunas casos, como el análisis de aceites y termografía, para los diagnósticos de fallas.

## 18.2 Instrumentación

Hoy en día existe una amplia gama de equipos desde colectores de datos hasta equipos que permiten realizar análisis en sitio, los cuales permiten realizar análisis en tiempo real.

El desarrollo de la electrónica ha permitido la evolución acelerada de estos instrumentos y software potentes de análisis, haciendo las tareas de inspección y análisis mucho más eficientes y con relativa facilidad.

La selección del instrumento y software adecuado radica una vez más, en las necesidades de cada empresa y la criticidad de los problemas que se presentan. Dentro de las marcas más escuchadas en el entorno industrial están SKF, SCHENCK, DLI, entre otras.

Dentro de los equipos básicos de monitoreo se encuentran por ejemplo:



**Vibration Pen Plus** es una herramienta de monitorización de vibraciones multiparámetro capaz de medir la vibración global (producida por problemas de rotación y estructurales, como desequilibrio, desalineación, aflojamiento, etc.) y capaz de realizar mediciones de la envolvente de aceleración que midan la vibración en frecuencias más altas (vibración causada por problemas con los elementos rodantes de los rodamientos o con los engranajes). Al efectuar las mediciones, se procesa la señal de entrada del sensor de la herramienta Vibration Pen Plus para obtener ambas mediciones en cada punto de la maquinaria: la vibración general y la envolvente de aceleración.

Dentro de la gama de analizadores están:



**Analizadores de la serie microlog**, diseñados para permitir que el usuario establezca un programa exhaustivo y periódico de monitorización de la condición.

Este equipo esta desarrollo para trabajar a través de módulos, los cuales son instalados en el equipo según las necesidades lo demandan, así se puede incluir modulo de balanceo, ensayo de impacto, grabadora de datos, entre otros, esto hace muy versátil al instrumento que se apoya de un poderoso software de análisis como es el @ptitude analysis.

Esta herramienta permite la colección y análisis de espectro de vibración de los equipos monitoreados, obteniendo las primeras apreciaciones en ruta y establecer criterios de estado de funcionamiento de los equipos prácticamente en tiempo real. La amplia compatibilidad con los diversos accesorios como los conjuntos de referencia de fase ópticos y láser, tacómetros, termómetros, lo hacen una herramienta versátil y completa para un programa de mantenimiento predictivo.

Debe quedar claro que la decisión de adquisición de uno de estos equipos esta en función de las necesidades de la planta, la criticidad de sus equipos y del presupuesto económico del departamento de mantenimiento de la empresa.

### **18.3 Las normas**

Atendiendo al ámbito de desarrollo y de aplicación pueden distinguirse los siguientes tipos de normas:

- ☞ **Normas Internacionales (ISO – International Standards Organization).** Se consideran de máxima prioridad en transacciones internacionales, siendo en la práctica el punto de partida para valorar la severidad de vibraciones. El principal inconveniente que presentan dichas normas es su carácter general. La severidad de la vibración en maquinarias está determinada según esta norma en la ISO 10816

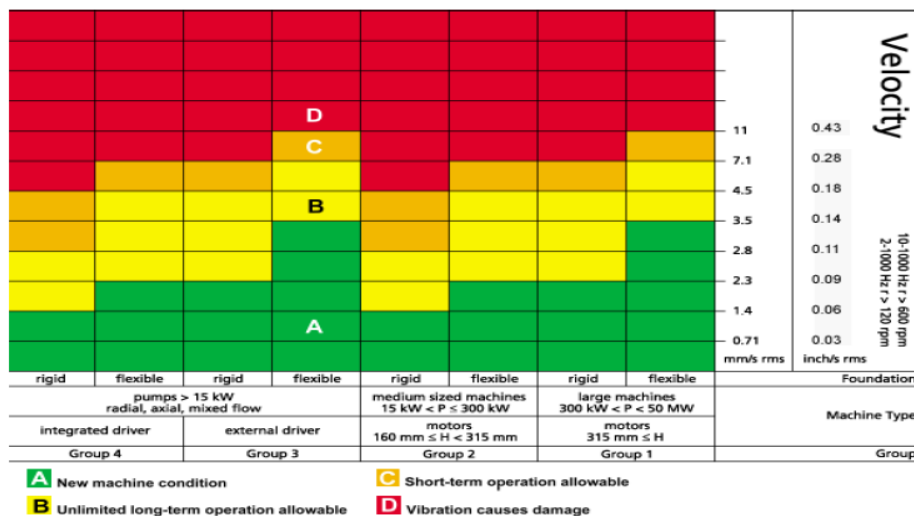


Fig. 18.1: Tabla de severidad de vibración (ISO 10816).

- ☞ **Normas Nacionales.** En El Salvador no se cuenta con este tipo de normas, por tanto se adopta las normas internacionales, como por ejemplo la ISO
- ☞ **Recomendaciones y guías de los fabricantes.** Son recomendaciones de los fabricantes sobre los niveles de vibración permisibles por sus equipos. En la mayor parte de los casos, se limitan al área de la turbomaquinaria, aunque hay una gran tendencia a exigir este tipo de información al fabricante cada vez que se adquiere un equipo crítico.
- ☞ **Normas internas.** Resulta recomendable desarrollar normativas internas propias de vibraciones por ser las que mejor se adaptan a los equipos tipo de cada planta productiva. Está es una de las tareas más difíciles dentro del Mantenimiento Predictivo, pero se ve recompensada a medio plazo por los excelentes resultados obtenidos.

## 18.4 Capacitación

La certificación es válida por cinco años, el honorario de certificación es de \$ 75.US/\$100. Después de cinco años, la recertificación es requerida previa reexaminación, o proporcionando evidencia de la práctica profesional, entrenamiento (formal o por correspondencia), o material publicado (artículos incluyendo publicados en revistas de vibraciones)

### **Vibraciones I**

El personal capacitado en el nivel de vibraciones I es capaz de leer las firmas de vibración y evaluar las condiciones de la maquinaria en base a la información de la vibración, así como de aislar los efectos de los distintos componentes de la maquinaria afectados, reconocer varios problemas comunes y es capaz de realizar recomendaciones para las correcciones.

### **Vibraciones II**

El personal certificado en vibraciones II es capaz de definir un correcto programa de monitoreo con técnicas de diagnóstico para mejorar el funcionamiento de la maquinaria rotatoria. También posee la capacidad de hacer recomendaciones para efectuar las acciones correctivas. Poseen la capacidad de mejorar los programas de monitoreo y análisis con avanzadas técnicas de medición.

### **Vibraciones III**

Un analista de nivel III es quien lidera el grupo de vibraciones, o bien, pueda tomar un rol de mayor importancia en el diagnóstico de las fallas y realizar recomendaciones finales. Esta persona entiende a fondo las opciones de configuración de los analizadores y colectores de vibración, cuenta con capacidades de medición especial, herramientas de análisis avanzadas y entiende un amplio rango de condiciones de falla. Esta en condición de capacitar a analistas en vibraciones II.

## CONCLUSIONES

- ☞ Los programas de mantenimiento industrial, han evolucionado desde el mantenimiento hasta la falla, al mantenimiento basado en la condición (CBM) y últimamente en el mantenimiento proactivo. Esto es debido a las exigencias y crecimientos de los mercados fomentando la necesidad de mayor producción.
- ☞ Sobre los departamentos de mantenimiento pesa la responsabilidad de que los activos se desempeñen dentro de los parámetros óptimos de funcionamiento, disminuyendo los tiempos muertos y aumentando la disponibilidad de los mismos.
- ☞ El desarrollo de la tecnología y la electrónica ha permitido la creación de instrumentos de medición y análisis que permiten determinar con cierta precisión fallos potenciales y el tiempo en que pueda ocurrir daños catastróficos en los equipos.
- ☞ Las técnicas predictivas y ensayos no destructivos (END), están desarrollándose tanto a nivel mundial como en la industria nacional, debido a los buenos resultados obtenidos en aquellas empresas que ya se encuentran implementando este tipo de técnicas dentro de sus programas de mantenimiento.
- ☞ Dentro de los beneficios obtenidos por la aplicación de las técnicas, están: el mejoramiento en la eficiencia de los activos, la disminución de los paros no programados, aumento en la producción, optimización de los elementos de las maquinas y vida útil de las mismas, eliminación de la causa raíz de los problemas que atacan a las máquinas.
- ☞ Debido a la aceptación de las técnicas predictivas y los logros obtenidos por aquellas que ya las implementan en sus plantas, la industria nacional esta demandando personal capacitado en este tipo de técnicas.
- ☞ La implementación de un laboratorio de técnicas predictivas dentro de la Universidad de El Salvador, permitirá la inducción de los estudiantes de ingeniería en estas áreas del mantenimiento industrial, conforme a las demandas de la industria nacional.



## **RECOMENDACIONES**

1. El desarrollo de una investigación de viabilidad de implementación de un laboratorio de técnicas predictivas y ensayos no destructivos (END), se presenta como un siguiente paso en este esfuerzo de desarrollar las condiciones mínimas para la preparación de los futuros ingenieros mecánicos, eléctricos, industriales y ramas afines de nuestra Universidad de El Salvador.
2. Los estudios subsiguientes en este tema deberán ir enfocados en la investigación de campo de la oportunidad de desarrollo de este laboratorio y la posibilidad de prestar servicios de capacitación de personal a la industria nacional además de ofertar los servicios profesionales en este rubro del mantenimiento predictivo.
3. La oportunidad se presenta para la implementación de una materia electiva que permita orientar e instruir a los estudiantes en este tipo de mantenimiento, desarrollando tanto teoría y práctica a través del laboratorio.

## REFERENCIAS

### **BIBLIOGRAFÍA:**

*La medición y el análisis vibraciones en el diagnóstico de máquinas rotativas*

Dr. Evelio Palomino Marín

CEIM (Centro De Estudios Innovación y Mantenimiento)

*Vibraciones básicas de máquinas.*

Ing. Ciro Martínez

Vibration Institute

*Machinery vibration análisis & predictive maintenance*

Cornelius Scheffer / Paresh Girdhar

IDC TECHNOLOGIES

*Análisis de las zonas de falla de motores eléctricos*

Ing. Juan C. Hidalgo

Grupo TERMOGRAM

**Física Universitaria**

volumen 2

Harris Benson editoriales CECSA

*Oil analysis basic*

Drew Troyer y Jim Fitch

Noria Corporation 2004

*Mecánica de fluidos y máquinas hidráulicas*

Claudio Mataix

Segunda edición

Ediciones del Castillo

**END. GENERALIDADES**

Ing. Ricardo Echeverría

**Laboratorio de ensayos no destructivos**

Universidad Nacional Del Comahue – Facultad De Ingeniería.

### **VISITAS TÉCNICAS:**

- Compañía Azucarera Central Izalco (CASSA).
- Industrias La Constancia (ILC).
- Cementos de El Salvador (CESSA).
- Mantenimiento Aeronáutico AEROMAN  
Aeropuerto de El Salvador.

**ENTREVISTAS:**

- Ing. Douglas Vladimir Mezquita.  
Jefe del Dpto. de Mantenimiento.  
Compañía Azucarera Central Izalco
- Ing. Tony Guerra  
Dpto. Mantenimiento Predictivo.  
Compañía Azucarera Central Izalco
- Ovidio Cartagena  
Técnico de Predictivo  
Central Izalco
- Edwin Contreras  
Técnico de Predictivo  
Central Izalco
- Walter Martínez  
Técnico de predictivo  
Central Izalco
- Ing. Luis Campos  
Facilitador de Mantenimiento  
Industrias La Constancia.(ILC)
- Orlando Alas  
ASNT NDT level III NDT Chief  
AEROMAN
- Ing. Raúl Aguilar  
Jefe de Mantenimiento Preventivo  
Cementos de El Salvador CESSA.
- Ing. Ricardo Rivas  
Encargado de Mantenimiento  
Cementos de El Salvador CESSA.

**Links:**

Partículas magnéticas.

<http://www.mailxmail.com/curso/vida/reparaciondeturbina/capitulo19.htm>

<http://www.magnaflux.com/products/products.asp?prod=Magnaglo&sub=Accessories&list=1>

[http://www.randtplus.com/particulas\\_magnetizables.htm](http://www.randtplus.com/particulas_magnetizables.htm)

<http://www.mailxmail.com/curso/vida/reparaciondeturbina/capitulo19.htm>

Orbitas polares:

<http://www.esimez.ipn.mx/labrotomecanica/mx.geocities.com/armando zam/publicaciones.html>

<http://www.pce-iberica.es/medidor-detalles-tecnicos/instrumento-de-ruido/sonometro-slt.htm>

<http://books.google.es/books?id=Lqt55GPqmzMC&pg=PA102&dq=analisis+de+vibraciones&lr=&sig=ACfU3U1W-4C5n7G4QpEGfzPeG2C-r6QbtA#PPA95,M1>

ultrasonido:

<http://www.google.com.sv/search?hl=es&q=arreglos+de+palpadores+en+delta+en+ultrasonido&btnG=Buscar&lr=>

[http://es.wikipedia.org/wiki/Ensayo\\_no\\_destructivo](http://es.wikipedia.org/wiki/Ensayo_no_destructivo)  
<http://apuntes.rincondelvago.com/ensayos-no-destructivos.html>  
[http://www.thermoequipos.com.ve/pdf/articulo\\_06.pdf](http://www.thermoequipos.com.ve/pdf/articulo_06.pdf)  
[http://books.google.com/sv/books?id=A3yDbxpP0JsC&pg=PA125&lpg=PA125&dq=ensayos+no+destructivos&source=web&ots=BsehD\\_2-tR&sig=sjY4LrPv0\\_QMCh1bY\\_DUFJEaJnY&hl=es&sa=X&oi=book\\_result&resnum=5&ct=result#PPA133,M1](http://books.google.com/sv/books?id=A3yDbxpP0JsC&pg=PA125&lpg=PA125&dq=ensayos+no+destructivos&source=web&ots=BsehD_2-tR&sig=sjY4LrPv0_QMCh1bY_DUFJEaJnY&hl=es&sa=X&oi=book_result&resnum=5&ct=result#PPA133,M1)  
<http://www.sieend.com.mx/pnd%20mt.htm>  
<http://www.skf.com>  
[www.elprisma.com](http://www.elprisma.com)  
[www.monografias.com](http://www.monografias.com)  
[www.spectraquest.com](http://www.spectraquest.com)  
[http://www.telediagnose.com/telediagnose/download/TD03\\_en.pdf](http://www.telediagnose.com/telediagnose/download/TD03_en.pdf)  
[http://fain.uncoma.edu.ar/materias/ensayos\\_no\\_destructivos/Catedra\\_END/6-Ultrasonido/Apunte\\_US.pdf](http://fain.uncoma.edu.ar/materias/ensayos_no_destructivos/Catedra_END/6-Ultrasonido/Apunte_US.pdf)

Corrientes de Eddy:

[http://www.ndt-ed.org/EducationResources/CommunityCollege/EddyCurrents/cc\\_ec\\_index.htm](http://www.ndt-ed.org/EducationResources/CommunityCollege/EddyCurrents/cc_ec_index.htm)  
<http://www.monografias.com/trabajos30/corrientes-eddy/corrientes-eddy.shtml>  
[http://www.olympusmexico.com.mx/spanish/ind/ind\\_eddy\\_esp.asp?d=6&s=42&c=89](http://www.olympusmexico.com.mx/spanish/ind/ind_eddy_esp.asp?d=6&s=42&c=89)

# ANEXOS

**Anexo 1: Tabla de Emisividades.**

<b>METALES</b>	<b>Estado superficie</b>	<b>Temperatura (°C)</b>	<b>Emisividad</b>	<b>NO METALES</b>	<b>Estado superficie</b>	<b>Temperatura (°C)</b>	<b>Emisividad</b>
Aluminio	placa pulida	25	0,040	Amianto	en cartón	37	0,960
Aluminio	placa pulida	200-600	0,038-0,06	Amianto	en papel	37	0,930
Aluminio	oxidado	100-500	0,20-0,33	Ladrillo	magnesita refractario	1000	0,380
Aluminio	placa mate	25	0,070	Ladrillo	rojo, rugoso	20	0,930
Antimonio	pulido	37-260	0,28-0,31	Ladrillo	gris, satinado	1100	0,750
Latón	oxidado	200-500	0,600	Ladrillo	silice	540	0,800
Latón	pulido	20-300	0,05-0,032	Carbón,	filamento	1050-1400	0,526
Latón	placa usada	50-350	0,220	Carbón,	carbonilla bujías	95-270	0,953
Latón	mate	50	0,202	Carbón,	negro de humo	20	0,930
Cromo	pulido	37-1100	0,058	Cerámica	alfarería, satinado	20	0,900
Cobre	negro oxidado	37	0,780	Cerámica	porcelana	22	0,920
Cobre	ligeramente mate	25	0,037	Cerámica	refractaria, negra	93	0,940
Cobre	pulido	37-260	0,04-0,05	Arcilla	caldeada	70	91
Cobre	pulido electrolítico	80	0,018	Hormigón	rugoso	37	0,94
Oro	no pulido	20	0,470	Vidrio	liso	22	0,940
Oro	pulido	37-260	0,020	Vidrio	Pyrex, plomo, sosa	260-530	0,95-0,85
Hierro	oxidado	100	0,740	Hielo	liso	0	0,966
Hierro	esmerilado	20	0,240	Hielo	rugoso	0	0,985
Hierro	pulido	425-1025	0,14-0,38	Mármol	grano fino pulido	22	0,93
Hierro	pulido electrolítico	175-225	0,052-0,064	Mica		37	0,75
Hierro	todo oxidado	20	0,69	Mampostería	emplastecida	0	0,930
Hierro	laminado	925-1100	0,87-0,95	Papel	ordinario	20	0,8-0,9
Fundición	mecanizada	22	0,44	Papel	amianto	20	0,950
Fundición	oxidada a 600°C	200-600	0,64-0,78	Papel	alquitranado	20	0,910
Plomo	oxidado a 200°C	200	0,63	Papel	ordinario	95	0,920
Plomo	oxidado gris	23	0,280	Yeso blanco	rugosa	20	0,930
Plomo	pulido	130-260	0,08-0,056	Porcelana	vidriada	20	0,930
Magnesio	pulido	37-260	0,07-0,13	Cuarzo fundido	rugoso	20	0,930
Magnesio	oxidado	275-825	0,55-0,2	Goma blanda	gris	25	0,860
Molibdeno	para filamentos	700-2600	0,10-0,20	Goma dura	negra rugosa	25	0,950
Molibdeno	pulido	150-480	0,02-0,05	Madera de haya	láminas	25	0,935
Monel	pulido	37	0,170	Madera de encina	láminas	25	0,885

Níquel	oxidado a 600°C	260-540	0,37-0,48	Tierra		37	0,950
Níquel	pulido	100-260	0,045-0,07	<b>PINTURAS</b>			
Níquel	electrolítico	37-260	0,04-0,06	Aluminio	bronce de	100	0,300
Platino	electrolítico	260-540	0,06-0,1	Aluminio	esmaltado rugoso	20	0,390
Platino	placa pulida	260-540	0,06-0,1	Aluminio pintado	calentado a 325°C	150-300	0,350
Platino	oxidado a 600°C	260-540	0,07-0,11	Aluminio	Al 10%, laca 22%	100	0,520
Platino	filamento	26-1225	0,04-0,19	Aluminio	Al 26%, laca 27%	100	0,300
Plata	pulida, pura	225-625	0,02-0,03	Laca	blanca	100	0,925
Plata	pulida	37-370	0,02-0,03	Laca	negra mate	80	0,970
Acero	pulido	23	0,160	Aceite	pintura	20	0,89-0,97
Estaño	brillante	225-265	0,02-0,03	Aceite pintura	todos los colores	100	0,92-0,96
Estaño	pulido	37-370	0,070	Baquelita	esmaltada	80	0,935
Tungsteno	para filamentos	3300	0,390	Esmalte	blanco rugoso	20	0,900
Tungsteno	filamento envejecido	25-3300	0,03-0,35	Esmalte	negro brillante	25	0,876
Cinc	oxidado	20	0,250	Pintura al aceite		1-200	0,885
Cinc		225-325	0.05-0.06	Imprimación minio		20-1100	0.93

**Anexo 2: Ejemplo de Instrucciones de ensayo por líquidos penetrantes**

Ejemplo de Instrucciones de ensayo por líquidos penetrantes de un cuerpo de válvula forjado, material acero inoxidable Siguiendo el proceso de penetrante coloreado eliminable con disolvente y revelador húmedo no acuoso.

*Instrucciones de ensayo para la inspección por líquidos penetrantes. Croquis de la pieza.*

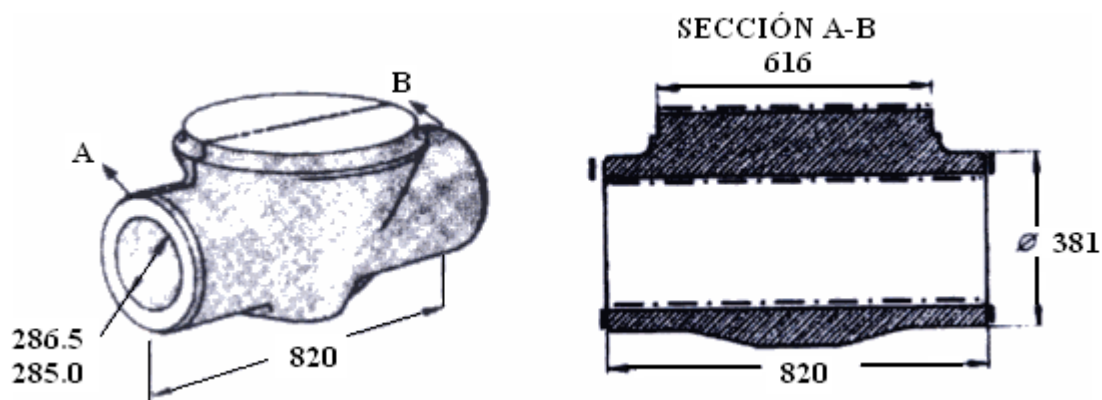


Figura tomada de Metal Handbook, Vol 11, ASM

Material: acero inoxidable tipo 316 Zona a ensayar:

Las superficies marcadas con línea discontinua no se ensayarán ahora por líquidos penetrantes, ya que serán ensayadas después del mecanizado.

Normas: **ASME V y VIII div.1.**

- 1) Sistema de penetrantes:
  - a) Penetrante coloreado visible, referencia \_\_\_\_ marca
  - b) Eliminador (disolvente), referencia \_\_\_\_ marca
  - c) Revelador húmedo no acuoso, referencia \_\_\_\_ marca
- 2) Limpieza previa con disolvente, utilizando trapos o brochas. Sistema de penetrantes:
- 3) Secado por evaporación durante 5 a 10 minutos.
- 4) Aplicar penetrante por pulverización o brocha. La temperatura del penetrante y la de la pieza se deberá mantener entre 15 y 50°C.
- 5) Dejar un tiempo de penetración de 15 a 25 minutos.
- 6) Eliminar el exceso de penetrante con papel absorbente o trapos limpios y secos. Cuando se observe visualmente que se ha quitado la mayor parte, terminar de quitar las trazas con un trapo limpio y seco, humedecido ligeramente con eliminador.
- 7) Secado a temperatura ambiente durante 5 a 10 minutos.
- 8) Aplicar revelador con pistola pulverizador, desde distancia de 15 cm, dejando una capa uniforme y del mínimo espesor para que cubra la superficie de ensayo.
- 9) A continuación inspeccionar con luz blanca, mínimo 1.000 lux sobre superficie, después de 7 minutos de la aplicación del revelador y antes de 30 minutos.
- 10) Criterios de aceptación y rechazo.  
No son aceptables:
  - Cuatro o más indicaciones alineadas, separadas menos que 1.6 mm de borde a borde, se considerarán como indicación lineal.
  - En la posición más desfavorable, diez o más indicaciones redondeadas en cualquier superficie de extensión 40 cm<sup>2</sup>, sin que la mayor dimensión de esta superficie exceda de 35 cm.
- 11) Reparación y reinspección:



Las piezas que contengan defectos su pueden reparar por esmerilado, siempre que se mantengan las tolerancias dimensiones especificadas, y se reinspeccionarán de nuevo por líquidos penetrantes para comprobar la eliminación del defecto.

**12) Limpieza final:**

Después de la reinspección, las piezas aceptadas se limpiarán con disolvente (eliminador) para quitar los restos de revelador.

**Anexo 3: Tiempo de penetración de líquido según tipo de defecto a detectar y tipo de líquido penetrante**

---

<b>TIPO DE DEFECTO</b>	<b>TIEMPO DE PENETRACIÓN (min.)</b>
Fisuras de tratamiento térmico.	2
Fisuras de amolado.	10
Fisuras de fatiga	10
En plásticos	1-5
En cerámicos	1-5
En herramientas de corte	1-10
En forjados	20
En soldaduras	10-20
Solapado en frío de fundiciones en matriz	10-20
Porosidad en cerámicos	3-10
En fundiciones en matriz	3-10
En soldaduras	10-20
Solapados de forja	20
Costuras	10-20

---

**TIEMPOS APROXIMADOS DE PENETRACIÓN PARA PENETRANTES  
COLOREADOS POST-EMULSIFICABLES.**

MATERIAL Y CONDICIÓN	DEFECTO	TIEMPO DE APLICACIÓN (MIN)	
		Temperatura 15 °C- 32°C	Temperatura 1°C - 15°C
<b>Todos los metales</b>	Fis. de trat. Term.	3 a 5	10 a 15
<b>Todos los metales</b>	Fis. De amolado	7 a 10	15 a 20
<b>Todos los metales</b>	Fis. De fatiga	7 a 10	15 a 20
<b>Plásticos</b>	Fisuras	3 a 5	10 a 15
<b>Cerámicos</b>	Fisuras	3 a 5	10 a 15
<b>Cerámicos</b>	Porosidad	3 a 5	10 a 15
<b>Herramientas de corte</b>			
Puntas de carburos	Bronceado pobre	3 a 5	10 a 15
De corte	Fis. en la punta.	3 a 5	10 a 15
De corte	Fis. en la caña.	3 a 5	10 a 15
<b>Metales</b>			
Fundic. de molde permanente	Porosidad de rechupe	3 a 5	10 a 15
Fundiciones en matriz	Porosidad superficial	3 a 5	10 a 15
Fundiciones en matriz	Solapado en frío	3 a 20	10 a 20
Forjados	Fisuras y solapados	7 a 20	15 a 20
Metal rolado	Costuras	7 a 20	15 a 15
Soldaduras de Al.	Fisuras y poros.	3 a 5	10 a 15
Soldaduras de acero	Fisuras y poros	7 a 20	15 a 20

**TIEMPOS DE PENETRACIÓN PARA PENETRANTES FLUORESCENTES LAVABLES CON  
AGUA**

MATERIAL	CONFORMADO	TIPO DE DEFECTO	TIEMPO DE PENETRACION (MINUTOS)
ALUMINIO	Fundiciones	Porosidad	5-15
		Cerrado en frío	5-15
	Forjados	Solapados	30
	Soldaduras	Falta de unión Porosidad	30 30
	Todos los conformados	Fisuras de fatiga	30
MAGNESIO	Fundiciones	Porosidad	15
		Cerrado en frío	15
	Forjados	Solapados	30
	Soldaduras	Falta de unión Porosidad	30 30
	Todos los conformados	Fisuras de fatiga	30
ACEROS INOXIDABLES	Fundiciones	Porosidad	30
		Cerrado en frío	30
	Forjados	Solapados	60
	Soldaduras	Falta de unión Porosidad	60 60
	Todos los conformados	Fisuras de fatiga	30
LATÓN Y BRONCE	Fundiciones	Porosidad	10
		Cerrado en frío	10
	Forjados	Solapados	30
	Partes bronceadas	Falta de unión Porosidad	15 15
	Todos los conformados	Fisuras de fatiga	30
PLÁSTICOS	Todos los conformados	Fisuras	5-30
VIDRIOS	Todos los conformados	Fisuras	5-30
HERRAMIENTAS CON PUNTAS DE CARBUROS		Falta de unión	30
		Porosidad	30
		Fisuras de amolado.	10
TITANIO Y ALEACIONES PARA ALTA TEMPERATURA		Todas	Use solamente con penetrantes postemulsificables.

**TIEMPOS DE PENETRACIÓN PARA PENETRANTES FLUORESCENTES POST-EMULSIFICABLES**

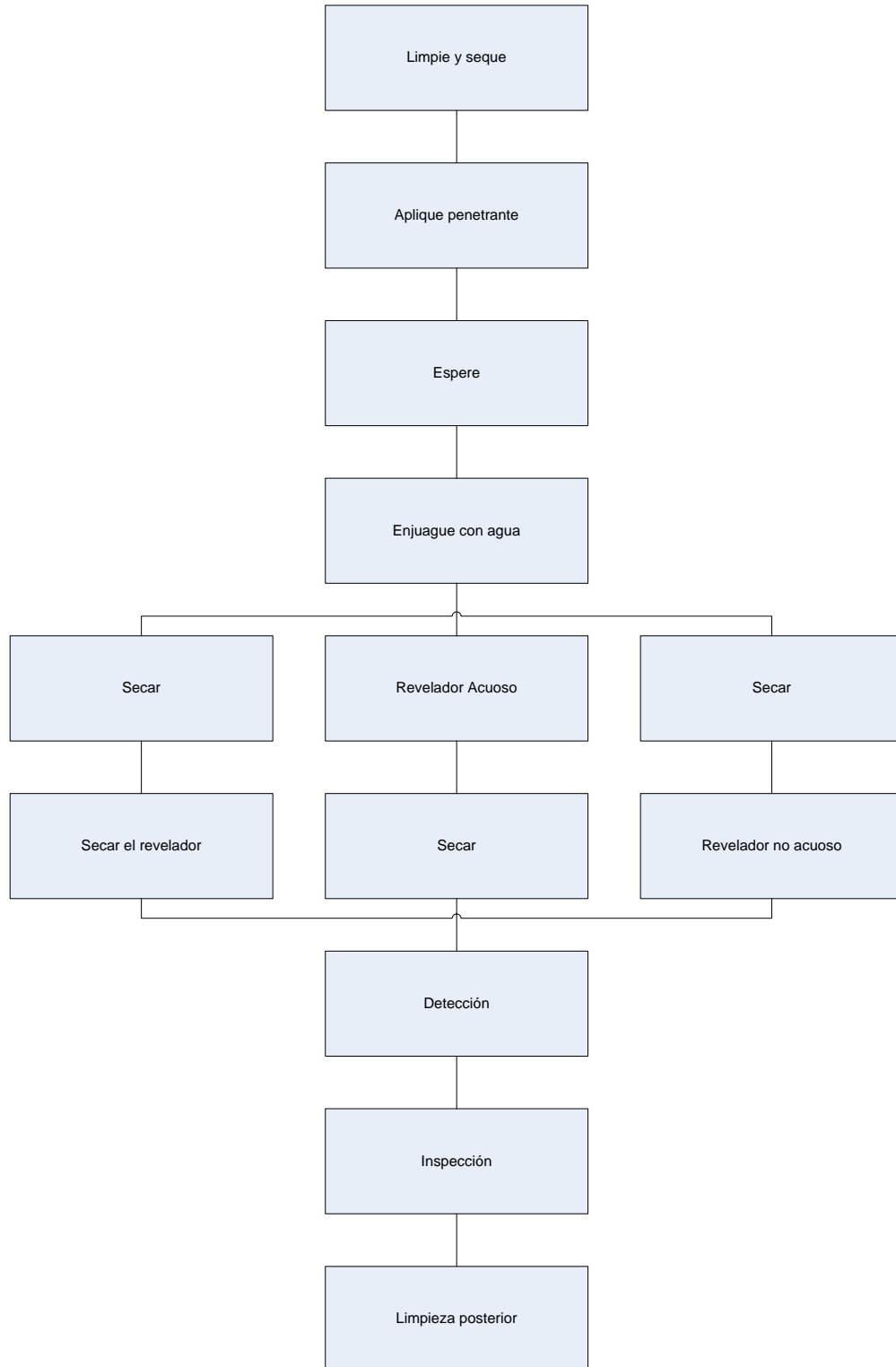
<b>MATERIAL</b>	<b>CONFORMADO</b>	<b>TIPO DE DEFECTO</b>	<b>TIEMPO DE PENETRACION (MINUTOS)</b>
<b>ALUMINIO</b>	Fundiciones	Porosidad	5
		Cerrado en frío	5
	Forjados	Solapados	10
	Soldaduras	Falta de unión	5
Porosidad		5	
	Todos los conformados	Fisuras de fatiga	10
<b>MAGNESIO</b>	Fundiciones	Porosidad	5
		Cerrado en frío	5
	Forjados	Solapados	10
	Soldaduras	Falta de unión	10
Porosidad		10	
	Todos los conformados	Fisuras de fatiga	10
<b>ACEROS INOXIDABLES</b>	Fundiciones	Porosidad	10
		Cerrado en frío	10
	Forjados	Solapados	10
	Soldaduras	Falta de unión	20
Porosidad		20	
	Todos los conformados	Fisuras de fatiga	20
<b>LATÓN Y BRONCE</b>	Fundiciones	Porosidad	5
		Cerrado en frío	5
	Forjados	Solapados	10
	Partes bronceadas	Falta de unión	10
Porosidad		10	
	Todos los conformados	Fisuras de fatiga	10
<b>PLÁSTICOS</b>	Todos los conformados	Fisuras	2
<b>VIDRIOS</b>	Todos los conformados	Fisuras	5
<b>HERRAMIENTAS CON PUNTAS DE CARBUROS</b>		Falta de unión	5
		Porosidad	5
		Fisuras de amolado.	20
<b>TITANIO Y ALEACIONES PARA ALTA TEMPERATURA</b>		Todas	20-30

---

**Anexo 4: Método “A” lavado con agua**

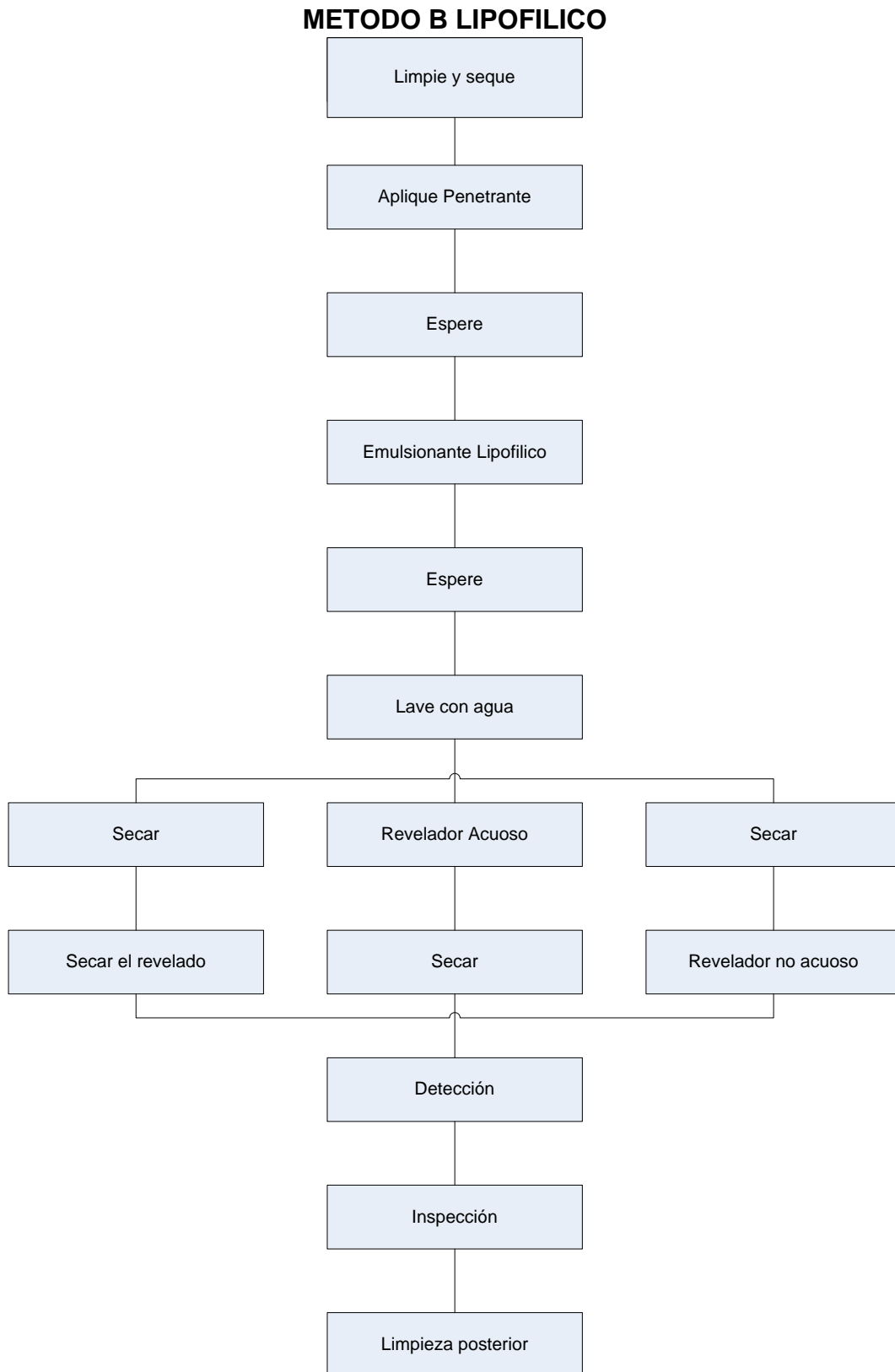
---

**METODO A LAVADO CON AGUA**



**Anexo 5: Método “B” lipofílico**

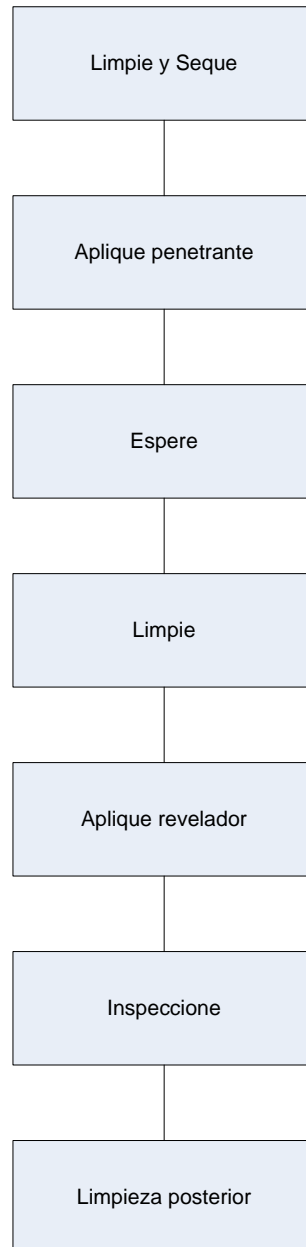
---



**ANEXO 6: Método “C” solvente removible**

---

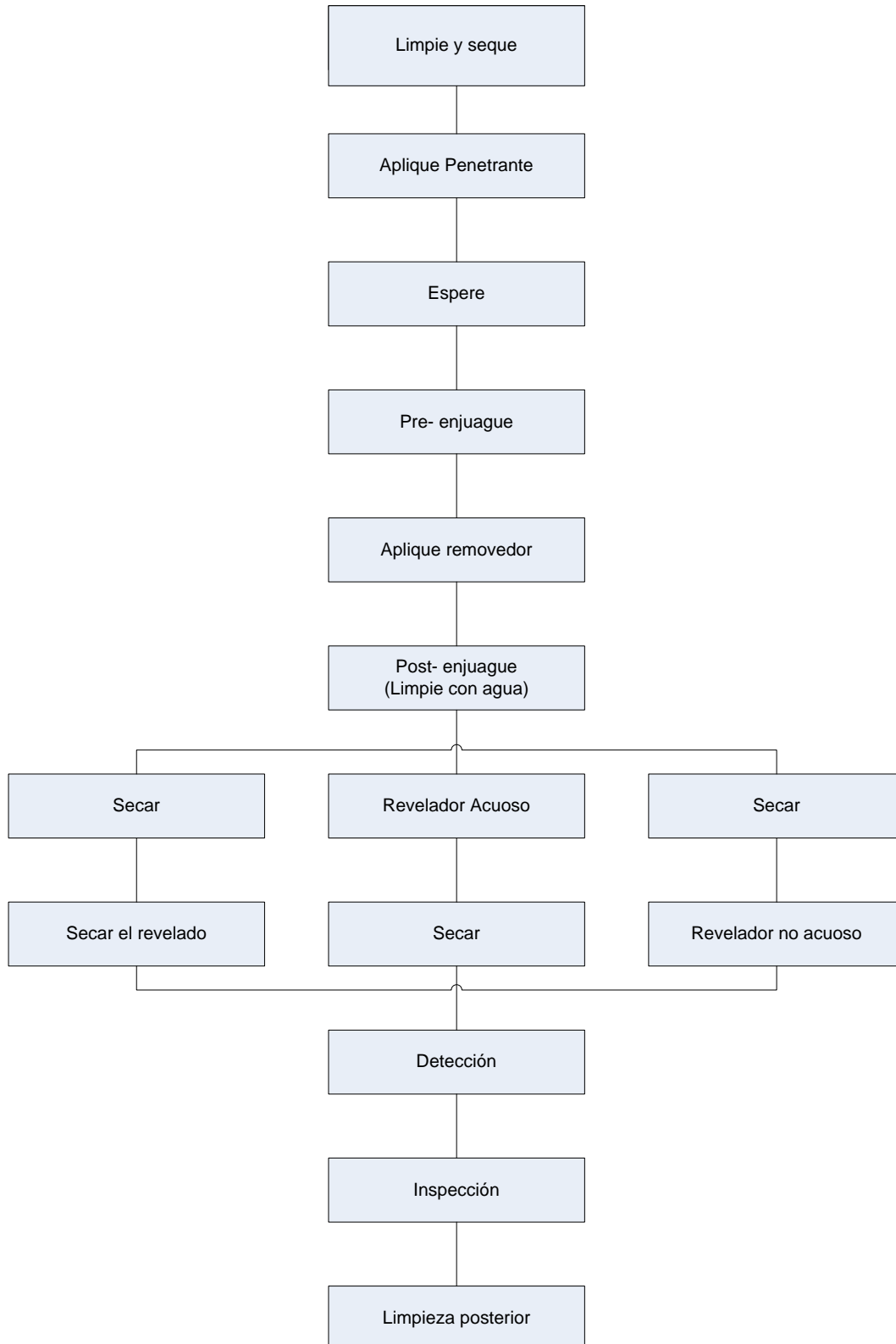
**METODO C SOLVENTE REMOVIBLE**



**ANEXO 7: Método “D” hidrofílico**

---

**METODO D HIDROFILICO**





# APENDICE

## APÉNDICE 2-A1

Existe la siguiente correlación:

$$C_L = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \times \sqrt{\frac{1-\mu}{(1+\mu)(1-2\mu)}}$$

$$C_t = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \times \sqrt{\frac{1}{2(1+\mu)}}$$

$$C_s = 0.9 C_t$$

Donde

$C_L$  = velocidad de la onda longitudinal.

$C_t$  = velocidad de la onda transversal.

$C_s$  = velocidad de la onda superficial.

$E$  = Módulo de elasticidad de Young.

$\rho$  = densidad.

$\mu$  = constante de Poisson.

*La velocidad de propagación de las ondas Lamb (tipos de flexión y dilatación) y las ondas de torsión dependen no solamente de las constantes del material dadas arriba, sino también de las dimensiones del mismo, del tipo de onda y de su frecuencia. La dependencia de la frecuencia de la velocidad de onda del sonido, es también llamada "dispersión"*

## APENDICE 2-A2

De la reversibilidad se extrae, de modo inmediato, que puede emplearse el mismo principio para generar y recibir ondas longitudinales ultrasónicas.

En efecto, en la mayoría de los casos se utiliza un mismo cristal como emisor y receptor.

	Causa	Esquema	Efecto
<b>Efecto Piezoeléctrico Directo</b>	Compresión sobre el cristal		Voltaje positivo sobre las caras
	Tracción sobre el cristal		Voltaje negativo sobre las caras
<b>Efecto Piezoeléctrico Inverso</b>	Voltaje positivo sobre las caras		Expansión del cristal
	Voltaje negativo sobre las caras		Contracción del cristal

El efecto piezoeléctrico no es propio de todos los cristales y sólo se produce en determinadas condiciones. El ejemplo más conocido es el cuarzo. Un cristal de cuarzo natural tiene una forma determinada, siempre recurrente, que se describe con ayuda de los ejes cristalográficos, designados ejes X, Y y Z, igual que en un sistema de coordenadas cartesianas normales.

El efecto piezoeléctrico sólo se consigue en el cuarzo si la lámina de cuarzo ha sido cortada del cristal, perpendicularmente al eje X o al eje Y. En el primer caso, la deformación mecánica del cristal tiene lugar en la misma dirección del campo eléctrico; en el segundo caso perpendicularmente a ella. Por esto se habla de cuarzos, u oscilaciones, de corte X y de corte Y.

Los cuarzos de corte X generan ondas longitudinales; los de corte Y, ondas transversales. En la mayoría de los casos entra en consideración el corte X.

Además del cuarzo, la turmalina como mineral natural, presenta también el efecto piezoeléctrico.

Una significación mucho mayor han alcanzado los transductores cerámicos sinterizadas que adquieren el efecto piezoeléctrico por "polarización", esto es un enfriamiento desde una alta temperatura característica del material con exposición a altos voltajes eléctricos. El efecto piezoeléctrico puede, sin embargo, perderse por despolarización cuando se excede la temperatura de Curie.

Los cerámicos sinterizados más importantes son el titanato de bario, el sulfato de litio, el zirconato de plomo-titanio (PZT) y el metanobiato de plomo.

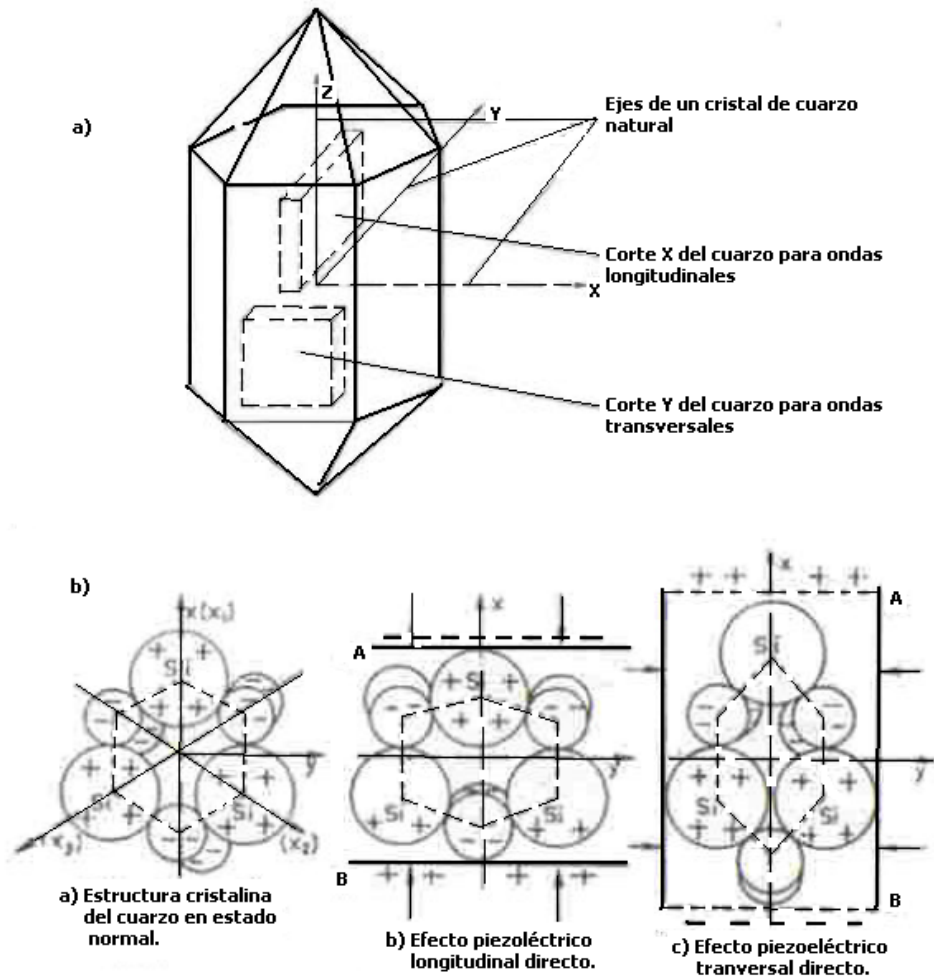


FIGURA 3.2: a) Sistema simplificado de coordenadas en un cristal de cuarzo; posiciones de cortes X e Y. e) Efecto piezoeléctrico del cuarzo

	Causa	Esquema	Efecto
Efecto Piezoeléctrico Directo	Esfuerzo de corte deforma el cristal a la izquierda		Voltaje positivo sobre las caras
	Esfuerzo de corte deforma el cristal a la derecha		Voltaje negativo sobre las caras
Efecto Piezoeléctrico Inverso	Voltaje positivo sobre las caras		Deformación del cristal hacia la derecha
	Voltaje negativo sobre las caras		Deformación del cristal hacia la izquierda

FIGURA 3.3: Efecto piezoeléctrico de cuarzo (corte Y)

### **APENDICE 2-A3**

Esto depende del diámetro del cristal y de la longitud de onda en el material de la pieza de trabajo y puede ser calculado como sigue:

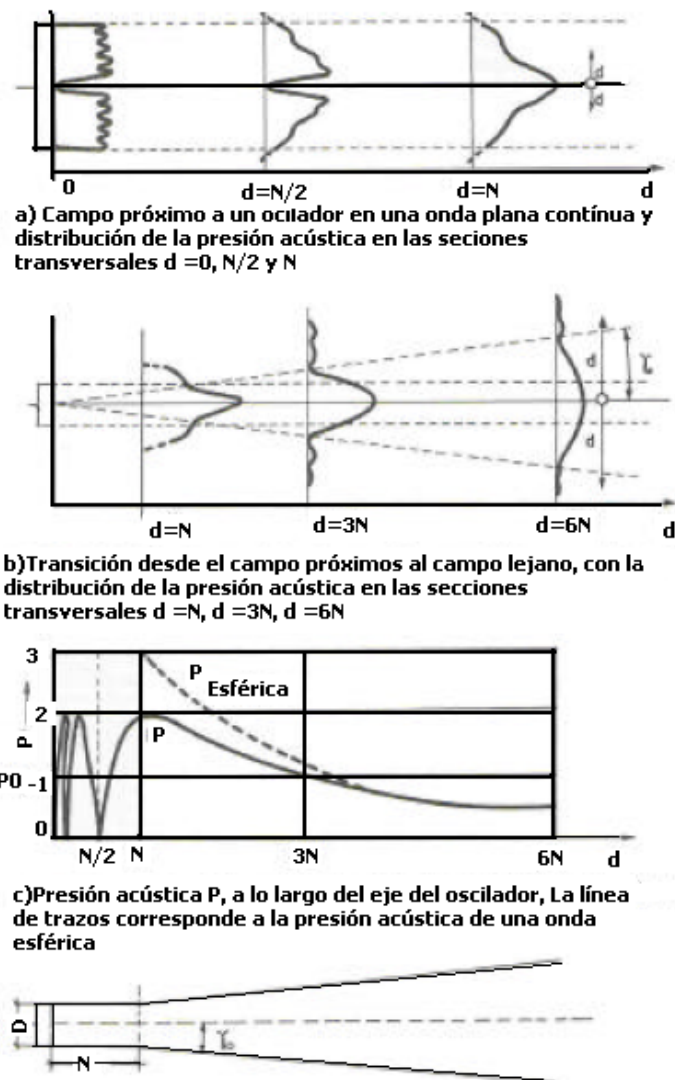
$$l_0 = \frac{D^2}{4 \times \lambda} = \frac{D^2 \times f}{4 \times c}$$

El significado de los símbolos en la fórmula son:  $l_0$ : longitud del campo cercano;  $D$ : diámetro del cristal (diámetro efectivo, normalmente un pequeño porcentaje menos que el real);  $\lambda$ : longitud de onda;  $f$ : frecuencia;  $c$ : velocidad del sonido.

Como la longitud del campo cercano puede ser determinado experimentalmente, las restantes magnitudes son derivadas de esto. De esta forma, el diámetro efectivo del cristal se calcula como:

$$D = \sqrt{l_0 \times \lambda}$$

La presión sónica en el campo cercano, y por consiguiente, la altura del eco causado por un defecto en esta zona, depende mucho de la ubicación del mismo dentro del haz. Las razones de este fenómeno son las interferencias en el campo cercano. La estimación del tamaño del defecto es prácticamente imposible si éste se encuentra en esa zona).



## APÉNDICE 2-A4

Esto se muestra en la Figura 3-17a y se puede calcular por medio de la fórmula:

$$p_s = 2 \times \text{tg} \alpha_i \times d$$

Donde:

$p_s$ : paso

$\alpha$ : ángulo del haz sónico

$d$ : espesor de chapa.

Para simplificar el cálculo del paso, el factor  $2 \times \text{tg} \alpha_i$  muchas veces es grabado sobre la carcasa del palpador. El borde de la pieza dará indicaciones con altura máxima cuando la distancia, entre el borde y el punto de emisión del haz, es un múltiplo entero del medio paso ( $p/2$ ).

Esto sucede alternativamente (Fig. 3-17b) en el borde superior e inferior de la chapa. La Fig. 3-17c muestra el principio de reflexión en un borde

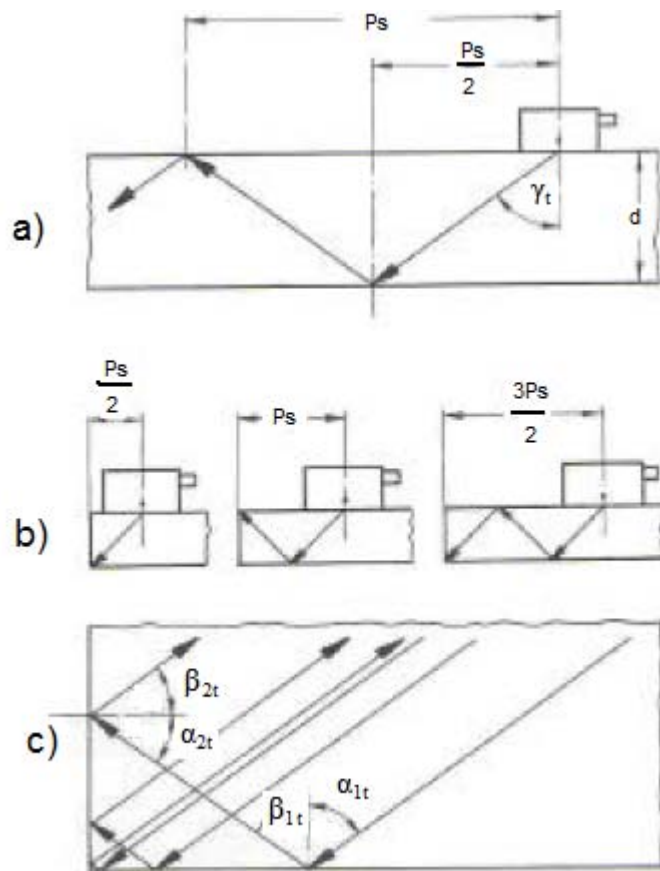


FIGURA 3-17: a) Definición de paso, b) Ecos obtenidos alternativamente del borde inferior y superior, c) Reflexión alrededor de un borde.

Si antes de la reflexión en la cara opuesta de la pieza de ensayo la onda ultrasónica alcanza directamente a un defecto, la llamada “distancia proyectada” ( $p$ ) se define como sigue:

$$p = s \times \text{sen} \alpha_t$$

Donde “ $s$ ” es la distancia (en la dirección del haz) entre la superficie y el reflector “ $p$ ” la distancia proyectada sobre la horizontal desde el punto de emisión del palpador al defecto.

$$t_0 = s \times \cos \gamma_t \quad (\text{Cuando la discontinuidad está antes del medio paso})$$

$$t_1 = 2 \times d - s \times \cos \gamma_t \quad (\text{Cuando la discontinuidad está más allá del medio paso})$$

Estas relaciones son muy importantes para la localización de defectos en una pieza. Algunas veces es más fácil, para el operador, medir la distancia desde el frente del palpador en lugar de hacerlo desde el punto de salida del haz. En esos casos uno está hablando de la “distancia proyectada acortada”.

Las relaciones que se han dado más arriba solamente son válidas cuando el ensayo se realiza sobre superficies planas. Si el ensayo se debiera realizar sobre un objeto curvo, el paso dependerá, adicionalmente, del radio de curvatura(R) (Fig. 3-18).

La fórmula para su cálculo es la siguiente:

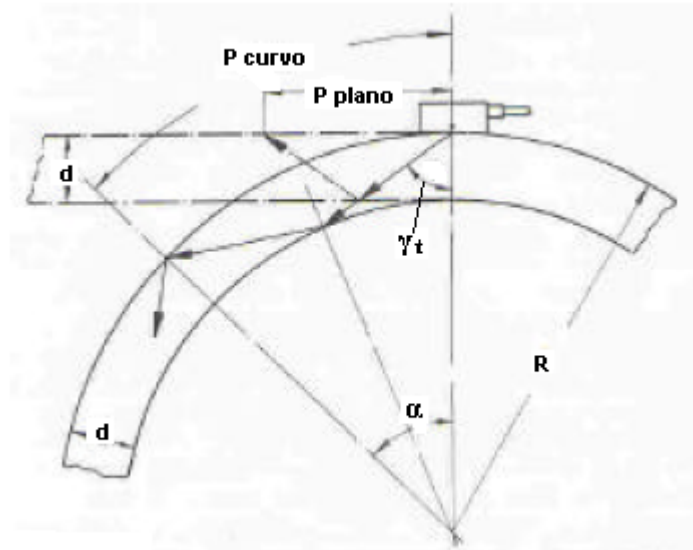
$$tg\gamma_t = \frac{\left(1 - \frac{2}{R}\right) \times \text{sen}\phi}{1 - \left(1 - \frac{d}{R}\right) \times \text{cos}\phi}$$

Donde “ $\phi$ ” es el ángulo en el centro de curvatura correspondiente al paso.

Como esta ecuación no puede ser resuelta para “ $\phi$ ”, el cálculo se lleva a cabo para un arreglo plano y la curvatura será tenida en cuenta por el factor de corrección k como se muestra a continuación:

$$P_s = 2 \times tg\gamma_t \times d \times k$$

El factor de corrección k depende de la relación entre el espesor de pared d y el diámetro D o del radio R y su valor se puede sacar de la Figura. 3-19.



**FIGURA 3-18: Distancia de una superficie curva con reflexión causada por la superficie interna. Superficie plana para comparación.**



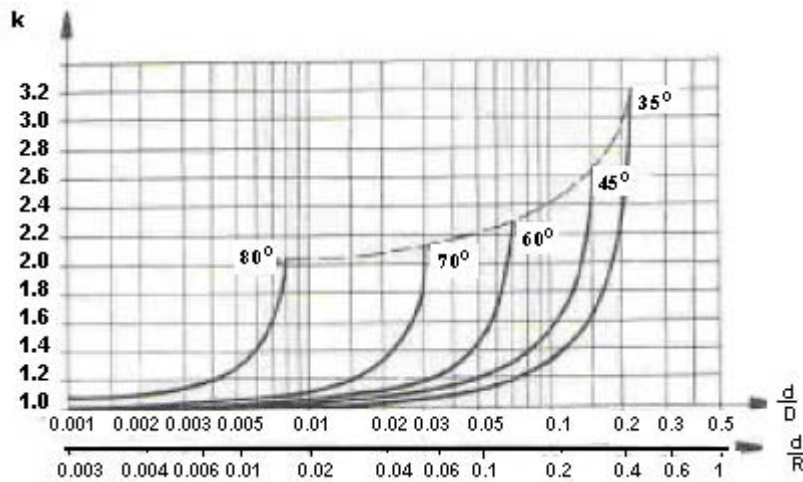


FIGURA 3-19: Factor de relación “k” como una función de la relación del espesor de la pared “d” al diámetro “D” o al radio de curvatura “R”

## APÉNDICE 2-A4

### La ley de refracción.

Cuando un rayo luminoso monocromático incide sobre la superficie de separación entre dos medios transparentes homogéneos e isotrópicos, una parte del rayo incidente se refleja y se queda en el medio de donde él provino y la otra parte se transmite al otro medio tomando una nueva dirección, es decir, desviándose. Se dice que al pasar de un medio al otro el haz luminoso se refracta.

El ángulo formado por el rayo incidente y la normal  $N$  es el ángulo de incidencia,  $\theta_1$ ;  $\theta_2$ , formado por el rayo refractado y la normal, es el ángulo de refracción (ver la figura).

Se puede demostrar que entre los ángulos  $\theta_1$  y  $\theta_2$  y las velocidades  $v_1$  y  $v_2$  de la luz en los medios 1 y 2, respectivamente, existe la siguiente relación

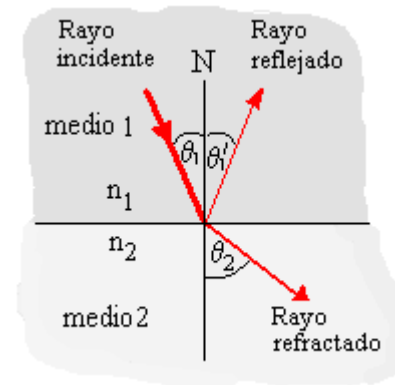
$$\frac{\text{sen}\theta_1}{\text{sen}\theta_2} = \frac{v_1}{v_2} \quad (1)$$

Por definición

$$n_1 = \frac{c}{v_1}$$

y

$$n_2 = \frac{c}{v_2},$$



Donde  $c$  es la velocidad de propagación de la luz en el vacío. De aquí se deduce que:

$$\frac{v_1}{v_2} = \frac{n_2}{n_1}$$

Por lo tanto, la igualdad (1) puede escribirse,

$$\frac{\text{sen}\theta_1}{\text{sen}\theta_2} = \frac{n_2}{n_1},$$

o simplemente,

$$n_1 \text{sen}\theta_1 = n_2 \text{sen}\theta_2.$$

que es la expresión matemática de la ley de refracción de Snell que afirma :

*Cuando se refracta un rayo luminoso se cumple:  $n_1 \text{sen}\theta_1 = n_2 \text{sen}\theta_2$ . El rayo incidente, el refractado y la normal a la superficie en el punto de incidencia se encuentran en el mismo plano.*


Para dos sustancias dadas la relación  $n_2 / n_1$  es constante, o sea,

$$\frac{\text{sen}\theta_1}{\text{sen}\theta_2} = \text{const.}$$


Según la ley de Snell el ángulo de refracción es menor que el ángulo de incidencia para un rayo que pasa del medio menos denso al medio más denso, es decir, el rayo se desvía hacia la normal. Si la luz se propaga del medio más denso al medio menos denso el rayo refractado se desvía alejándose de la normal.

De la fórmula (1) se desprende siendo el ángulo de incidencia igual a cero ( $\theta_1 = 0$ ), será también igual a cero el ángulo de refracción ( $\theta_2 = 0$ ), ya que  $v_1 / v_2 \neq 0$ , lo que significa, que el rayo que incide perpendicularmente a la superficie de separación de los medios, no se refracta al pasar de un medio al otro.

### APÉNDICE 3-A1 Equipos Básicos De Monitoreo

Equipo	Precio
<p data-bbox="232 1192 748 1220"><b>Termómetro por infrarrojos CMAC 4200-SL</b></p>  <p data-bbox="232 1629 1049 1656"><b>Medición de un amplio margen de temperaturas a una distancia segura.</b></p> <p data-bbox="232 1707 1049 1871">El termómetro por infrarrojos SKF CMAC 4200-SL con láser, es un termómetro que mide a distancia, de fácil uso, resistente y portátil. Ideal para una amplia serie de tareas de mantenimiento, el CMAC 4200-SL se puede conectar directamente a los colectores de datos portátiles de SKF para</p>	<p data-bbox="1076 1192 1227 1220"><b>\$3,261.56</b></p>

<p>una medición de temperaturas rápida y precisa. Lleva incorporado una tabla que incluye 30 listados preconfigurados de emisividad de materiales de fácil acceso, permitiendo una medición precisa de distintos tipos de superficies.</p> <ul style="list-style-type: none"><li>■ Amplio rango de temperaturas de -30 °C a 900 °C</li><li>■ Precisión de la lectura <math>\pm 1\%</math></li><li>■ Compatible con los colectores de datos portátiles de SKF</li><li>■ Diseñado para entornos físicamente difíciles</li><li>■ De fácil uso</li><li>■ Círculo de visión láser 16-puntos, con una relación distancia a tamaño de punto de 60:1</li><li>■ Emisividad ajustable con tabla incorporada</li><li>■ Tiempo de respuesta corto</li></ul>	
<p><b>Cámara termográfica avanzada TMTI 2DT</b></p> <div data-bbox="240 695 867 1157" data-label="Image">The image shows two handheld thermal imaging cameras. The camera on the left is shown from the front, displaying a lens and a yellow warning label. The camera on the right is shown from the front, displaying a thermal image on its screen. The thermal image shows a color gradient from blue (cooler) to red (warmer), with a central area of high temperature.</div> <p><b>Imágenes termográficas completas de alta resolución con función de doble rango térmico.</b></p> <p>La TMTI 2DT es una cámara termográfica avanzada de fácil manejo que realiza imágenes de alta calidad mediante radiaciones infrarrojas invisibles. Las imágenes de alta resolución (160x120 /19 200 píxeles) se muestran en una gran pantalla de 3½” retroiluminada, que facilita su visualización. Suministrada con un potente software para PC y para la redacción de informes (Se requiere MS Windows 2000, XP, O Vista), permite al usuario realizar exhaustivos análisis de datos y mejora la calidad de las imágenes.</p> <p>La cámara termográfica TMTI 2DT cuenta con varias funciones avanzadas integradas para la medición de temperaturas, tales como, un localizador automático de puntos calientes y fríos, visualización de la temperatura máxima/mínima de un área y visualización de la diferencia de temperatura de dos puntos especificados por el usuario. Adecuada para entornos industriales, la TMTI 2DT se suministra en un maletín robusto con su</p>	<p><b>\$9,734.00</b></p>

<p>correspondiente software, pilas recargables, cargador para las pilas, cubierta protectora de caucho, filtro para el rango de alta temperatura y una tarjeta de memoria SD para el almacenamiento de imágenes.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>■ Su diseño compacto, ergonómico y peso ligero hacen que la TMTI 2DT sea adecuada para ser utilizada en la mayoría de las aplicaciones industriales.</li> <li>■ Su menú de fácil navegación hace que la TMTI 2DT sea un instrumento sencillo de utilizar.</li> <li>■ Sus técnicas de medición sin contacto permiten la realización de mediciones de forma segura en máquinas en funcionamiento.</li> <li>■ Amplio rango de temperaturas de medición desde -10 °C a 500 °C hace que sea ideal para el mantenimiento predictivo.</li> <li>■ Corrección de emisividad seleccionable por el usuario de 0,2 a 1,0 con compensación de temperatura ambiente reflejada, ayuda a asegurar que la TMTI 2DT sea adecuada para casi cualquier aplicación.</li> <li>■ Una medición de temperatura práctica en K, °C y °F elimina la necesidad de convertir las mediciones de temperatura.</li> <li>■ El puntero láser indica el área de interés. Resulta fácil asociar el punto caliente en la pantalla con el objetivo en el campo.</li> <li>■ Se puede elegir entre 4 paletas de color diferentes (hierro, arco iris, arco iris de alto contraste y escala de grises) para facilitar la visualización.</li> <li>■ Un campo de visión de 20° x 15° permite visualizar la aplicación de forma fácil.</li> <li>■ Gran capacidad de almacenamiento de imágenes térmicas, se pueden almacenar hasta 1.000 imágenes (como datos radiométricos) en la tarjeta SD suministrada. Una colección de datos y un reporte subsiguiente fáciles.</li> <li>■ La cubierta protectora de caucho ayuda a proteger la cámara de daños</li> </ul>	
<p><b>Medidor de vibraciones Penplus. Serie CMVP</b></p> <p><b>Una potente combinación para la detección de defectos en la máquina y en el rodamiento</b></p>  <p>Una monitorización de estado multiparámetro proporciona dos métodos distintos para monitorizar el estado de la maquinaria. Esto permite la detección temprana de problemas específicos de la maquinaria y distintas formas de medir los cambios de estado de la misma. El medidor de vibraciones Penplus es una herramienta de monitorización de vibraciones multiparámetro, capaz de medir las vibraciones globales causadas por problemas mecánicos y estructurales de la máquina, como desequilibrios, desalineaciones y piezas mecánicas sueltas. También es capaz de medir las</p>	<p>\$655.35</p>

<p>vibraciones de alta frecuencia causadas por los elementos rodantes de los rodamientos o por problemas en los engranajes. Una monitorización multiparámetro proporciona datos fiables y exactos que sirven de base para planificar el mantenimiento, así como para la detección temprana, la confirmación y el seguimiento preciso de los fallos de los rodamientos y la maquinaria.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>■ Mide vibraciones de baja frecuencia, según la normativa ISO 10816, de 10 Hz a 1 kHz, para comprobar el estado global de la máquina</li> <li>■ Evaluación de las vibraciones en máquinas industriales no-recíprocas</li> <li>■ Envolvente de aceleración para la detección temprana de fallos en rodamientos y engranajes</li> <li>■ Tan ligero y compacto que cabe en su bolsillo</li> <li>■ Operación fácil pulsando un solo botón</li> <li>■ Pantalla de fácil lectura con dos valores</li> </ul>	
<p><b>MicroVibe P CMVL 3850</b></p> <p><b>Poder de análisis sin complejidades</b></p> <div data-bbox="235 871 527 1249" data-label="Image"> </div> <p>El módulo de expansión de este económico instrumento de medición se acopla a la ranura de la tarjeta Compact Flash (CF Type II) de la Agenda Personal de Datos (PDA) y funciona con el sistema operativo Windows. Esta herramienta portátil de fácil uso y versátil identifica los problemas y evalúa el estado de la maquinaria de forma rápida y sencilla. El MicroVibe P recopila y muestra las mediciones de la vibración global y automáticamente ofrece criterios de severidad de la velocidad y los niveles de envolvente de aceleración medidos, permitiendo así una evaluación precisa, fiable e inmediata del estado de los rodamientos o la máquina.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>■ Plataforma PDA universal con el sistema operativo Windows™ Mobile OS de fácil uso</li> <li>■ Muestra la vibración global, la forma de onda de tiempo, los análisis de espectros FFT y una indicación temprana de la degradación de los rodamientos</li> <li>■ De fácil uso tanto para el personal experimentado como para el personal inexperto</li> <li>■ Diccionario de vibraciones incorporado</li> <li>■ Permite que los usuarios puedan descargar y guardar datos globales y espectros FFT en un PC. Esto servirá para su posterior análisis y se podrán establecer gráficos de tendencias con el software de gestión incorporado</li> <li>■ El kit incluye un módulo MicroVibe P, software de gestión de datos para</li> </ul>	<p>\$4,725.00</p>

<p>el MicroVibe P, acelerómetro y cable, punta extensora y base magnética, auriculares y un maletín de transporte (no incluye la PDA)</p>	
<p><b>Controlador del estado del aceite TMEH 1</b></p> <p><b>Detecta cambios en el estado del aceite</b></p> <p>El controlador de aceite SKF TMEH 1 mide los cambios en la constante dieléctrica de un aceite. Por comparación de las mediciones obtenidas con un mismo aceite nuevo y usado (misma marca y características), el controlador de aceite SKF es capaz de determinar el grado del cambio sufrido por la constante dieléctrica del aceite. El cambio dieléctrico está directamente relacionado con la degradación y el nivel de contaminación del aceite y permitirá al usuario conocer los intervalos óptimos para el cambio del aceite, así como detectar aumentos en el desgaste mecánico y pérdida de propiedades lubricantes del aceite. Para facilitar el control de tendencia de los análisis, el instrumento muestra lecturas numéricas.</p> <p><b>Por favor, advierta que:</b></p> <p>El controlador SKF TMEH 1 no es un instrumento analítico en sí. Es sólo un equipo que detecta solamente los cambios del estado del aceite. Las lecturas visuales y numéricas que indica el equipo son sólo una guía para realizar la tendencia de las lecturas comparativas de un aceite nuevo y usado del mismo tipo y marca. No hay que fiarse únicamente de las lecturas numéricas.</p> <p>Indica los cambio sufridos por un aceite debidos a:</p> <ul style="list-style-type: none"><li>☞ Contenido de agua</li><li>☞ Contaminación por arburante</li><li>☞ Contenidos metálicos</li><li>☞ Oxidación</li><li>☞ Manual y muy fácil de utilizar</li><li>☞ Lecturas numéricas para facilitar el control</li></ul>	<p>\$959.45</p>



**Viscosímetro portátil TMVM 1**



\$3,651.25



**Reduzca los costos y largos análisis de laboratorio**




El SKF TMVM 1 es un viscosímetro rotacional portátil que mide de forma rápida y fiable la viscosidad de los aceites lubricantes y fluidos hidráulicos. Es adecuado tanto para mediciones cuantitativas como cualitativas. El TMVM 1 es un equipo adecuado para hacer una primera comprobación midiendo in-situ. Comprobando regularmente la viscosidad de los aceites se obtiene información puntual sobre el estado de los mismos, lo que puede afectar la lubricación y el rendimiento de la máquina.

- Su diseño compacto y ligero y su portabilidad hacen que sea un equipo esencial para empresas de servicio y operarios de mantenimiento
- Se suministra como estándar con un rotor adecuado para un rango de viscosidades entre 30 y 1300 mPas, abarcando la gama de viscosidad de la gran mayoría de aceites lubricantes
- Su diseño ergonómico facilita su operación con una sola mano
- La lectura directa del resultado elimina la necesidad de complicados cálculos adicionales
- El uso del recipiente de medición suministrado asegura la reproducción de las condiciones para medir con precisión
- Excelente capacidad de repetición de resultados, lo que permite conocer con precisión el estado de un aceite
- Aviso de recalibración que se muestra en el viscosímetro, permite una recalibración puntual
- Se dispone de rotores alternativos como accesorios para medir la viscosidad de otros fluidos
- Funciona con pilas (4 x AA alcalina) y no requiere conexión a la corriente eléctrica. Por lo tanto, es adecuado para los ensayos in-situ
- Suministrado en un maletín robusto para facilitar su transporte

<p><b>Microlog CMXA 70 GX-M</b></p>  <p>Permite la colección y almacenamiento de datos de medición en la maquinaria según rutas configuradas y/o puntos de medición, mientras el software @ptitude Analyst facilita el despliegue de gráficos de tendencia, espectros y ondas en el dominio del tiempo.</p> <p>Es un colector de datos que reúne, almacena y registra tendencias de los datos de vibración y de proceso, incluida la aceleración con envolvente -con 4 filtros de entrada seleccionables- a fin de mejorar las características de detección de fallos en los rodamientos y los engranajes.</p> <p>El programa de Balanceo Dinámico en uno o dos planos del MICROLOG CMXA 70 permite corregir esta fuente frecuente de problemas en las máquinas que afecta directamente la vida útil de los rodamientos y otros componentes asociados.</p> <p>El Módulo “Sin Ruta” del MICROLOG CMXA 70 el permite efectuar mediciones y análisis directamente sobre el terreno en el que se están realizando las mediciones sin necesidad de haber configurado rutas desde un software.</p>	<p>\$14,560.00</p>
<p><b>SOFTWARE @PTITUDE ANALYST para microlog</b></p>  <p>El programa de software creado por SKF, @ptitude Analyst, permite administrar, manipular y analizar los datos de la condición de la maquinaria recolectados por los equipos portátiles y sistemas ON-LINE de SKF.</p> <p>La ventaja de jerarquía Windows, permite fácilmente abrir puertas en la estructura ilimitada de esta e incluye los indicadores estándar de alarma para tener una rápida y fácil retroalimentación en cuanto a los niveles en puntos, máquinas o plantas inclusive. Adicionalmente provee la creación de alarmas globales según norma ISO, de bandas laterales, y de envolvente de espectro a partir de un espectro base. Todas estas pueden ser compartidas y utilizadas</p>	<p>\$16,560.00</p>



**Herramientas y técnicas del mantenimiento Predictivo.**

<p>en cualquier punto y/o máquina configurada.</p>	
<p><b>Tinte SKL Spotchet Penetrante</b></p>  <ul style="list-style-type: none"> <li>☞ Penetrante base agua.</li> <li>☞ Lavable con agua.</li> <li>☞ Color rojo a la luz del día y fluorescente naranja con uso de luz ultravioleta</li> </ul>	<p>\$11.67 por bote</p>
<p><b>Modelo: EPOCH 4B</b></p> <p>Combina su bajo costo con numerosas funciones prácticas de medición. Este detector de fallas Panametrics-NDT™ ofrece algunas opciones de software.</p> 	<p>\$6,737.30</p>
<p><b>Yugo Magnetico Y-6 de C.A</b></p>  <ul style="list-style-type: none"> <li>☞ Equipo de inspección por partículas portátiles 750-1500 AMPS</li> <li>☞ Maleta</li> <li>☞ Polvo rojo 8-A, 1-lb</li> <li>☞ Polvo gris, 1-lb</li> <li>☞ Paño limpiador</li> <li>☞ Plumón marcador de metales</li> <li>☞ Toallas limpiadora de manos</li> <li>☞ Pera para aplicar polvos.</li> </ul>	<p>\$1,437.57</p>

## Glosario

---

### A

**Absorción:** (radiación electromagnética): absorción de luz y otras ondas electromagnéticas por un material.

**Aceite:** Un líquido grasoso, untuoso de origen animal, vegetal, mineral o sintético.

**Aceite:** Un líquido grasoso, untuoso de origen animal, vegetal, mineral o sintético.

**Aceite básico:** La base fluida, usualmente un producto refinado del petróleo o material sintético, en el que los aditivos son mezclados para producir lubricantes terminados.

**Aceite compuesto:** Un aceite de petróleo al que se le han agregado otras sustancias químicas, especialmente aceites grasos.

**Aceite hidráulico:** Fluido que sirve como medio de transmisión de potencia en un sistema hidráulico. Los más comunes son los fluidos de petróleo, aceites minerales, sintéticos y mezclas de agua glicol.

**Aceite mineral:** Aceite derivado del petróleo o de una fuente mineral, a diferencia de algunos aceites que tienen origen en plantas y animales.

**Aceite multigrado:** Un aceite que cumple los requerimientos de más de un grado de la clasificación de viscosidad y puede ser capaz de ser usado en un rango de temperatura más amplio que un aceite monogrado.

**Aceite sulfurizado:** Aceite al cual se le ha adicionado azufre o compuestos de azufre.

**Aceitosidad:** Aquella propiedad del lubricante que produce baja fricción bajo condiciones de lubricación escasa. Mientras más baja la fricción, mayor es la aceitosidad del lubricante.

**Aceleración:** Razón de cambio de la velocidad respecto al tiempo.

**Acelerómetro:** Sensor y transductor cuya entrada es la amplitud de aceleración y tiene una salida de voltaje de baja impedancia.

**Acidez:** En lubricantes, la acidez denota la presencia de constituyentes de tipo ácido cuya concentración es usualmente definida en términos de número ácido. Los constituyentes varían de acuerdo a su naturaleza y pueden o no influenciar marcadamente el desempeño del lubricante.

**Ácido:** En un sentido restringido, cualquier sustancia que contiene hidrógeno en combinación con un no metálico o radical no metálico y capaz de producir iones de hidrógeno en solución.

**Acoplamiento:** Unión entre dos partículas adyacentes o medio.

**Aditivo:** Un compuesto que mejora algunas propiedades o que imparte algunas propiedades nuevas al fluido básico. En algunas formulaciones de fluidos hidráulicos, el volumen de aditivos puede constituir hasta un 20% de su composición final. Los tipos más importantes de aditivos incluyen anti-oxidantes, aditivos anti-desgaste, inhibidores de corrosión, mejoradores del índice de viscosidad y anti-espumantes.

**Aereación:** El estado de aire en suspensión en un líquido como un lubricante o un fluido.

**Álcali:** Una sustancia conteniendo propiedades básicas (opuesto a ácido). En un sentido restringido, es aplicado a los hidróxidos de amonio, litio, potasio y sodio. Los materiales alcalinos en los lubricantes, neutralizan los ácidos para prevenir desgaste ácido y corrosivo en motores de combustión interna.

**Alineación:** Posición en la cual las líneas centro de dos ejes deben ser lo más colineales posible, durante el tiempo de operación normal de la máquina.

**Amortiguación o atenuación:** Decremento en el tiempo de la amplitud de una oscilación.

**Amolado:** Operación que consiste en desgastar la superficie de una pieza de trabajo mediante el uso de un abrasivo.

**Ampere:** Unidad de corriente cuyo símbolo es una A. también posee submúltiplos como miliampere.

**Amplitud:** Es el máximo valor que presenta una onda sinusoidal.

**Análisis espectral:** Es la interpretación que se le hace a un espectro para determinar el significado físico de lo que pasa en una máquina.

**Análisis espectrográfico:** Determinación de la concentración de elementos representados en el fluido contaminado.

**Análisis gravimétrico:** Un método de análisis en el que puede ser medido el peso del contaminante seco por unidad de volumen de fluido, mostrando el grado de contaminación en términos de miligramos de contaminante por litro de fluido.

**Anisotropía:** diferentes propiedades características de los materiales según la dirección del mismo.

**Antioxidantes:** Prolongan el periodo de inducción del aceite básico en la presencia de condiciones oxidantes y metales catalizadores a elevadas temperaturas. El aditivo es consumido y los productos de degradación se incrementan no solo en condiciones de temperaturas elevadas y sostenidas, sino también con el incremento de condiciones de agitación mecánica o turbulencia y contaminación -aire, agua, partículas metálicas y polvo.

**Anodo:** Electrodo positivo en el que se produce la oxidación, es decir la donación de electrones.

**Arenado:** Es el impacto de arena a alta velocidad contra una superficie que se desea tratar. Suele ser utilizado para la eliminación de óxidos, pinturas en mal estado o cualquier tipo de corrosión. También como acabado superficial de revestimientos, se realiza mediante la proyección de arena por medio de aire a presión.

**Armónico:** Son frecuencias de vibración que son múltiples integrales de una frecuencia fundamental específica.

**Armónico fraccionario:** Armónicos que se encuentran entre los armónicos principales y son fracciones de la frecuencia fundamental.

**Asperjar:** esparcir un líquido en pequeñas gotas.

**Atenuación:** pérdida de potencia sufrida por una señal al transitar por cualquier medio de transmisión.

**Atomizador:** Dispositivo que se coloca en la boca de un recipiente y sirve para esparcir líquidos pulverizándolos en partículas muy pequeñas, también se le conoce como rociadores o Spray.

**Axial:** Posición del sensor que va en el sentido de la línea del eje.

## **B**

**Balaceo:** Procedimiento por medio del cual se trata de hacer coincidir el centro de masa de un rotor con su centro de rotación, de manera que se pueda eliminar el mayor número de fuerzas inerciales.

**Banda espectral:** concentración de frecuencias alrededor de una frecuencia nominal esta banda es llamada también canal.

**Bandeamiento lateral:** Son líneas espectrales que aparecen espaciadas a igual frecuencia, alrededor de una línea central. Esta es la mezcla de dos señales, en la cual la línea central pertenece a una y las líneas laterales pertenecen a la otra.

**Bobina:** componente pasivo de un circuito eléctrico que, debido al fenómeno de la autoinducción, almacena energía en forma de campo magnético.

**Bobina o cable enrollado:** Arrollamiento realizado con un conductor a fin de generar un campo magnético, por lo general en su interior.

**Bobina de magnetización:** Arrollamiento cuyo fin es magnetizar, usualmente se le inserta un núcleo de acero en su interior para lograr un máximo flujo.

**Bromuro de plata:** es un compuesto químico, cuya fórmula es AgBr, ampliamente utilizado en el campo de la fotografía debido a su sensibilidad a la luz; se emplea en la emulsión del papel fotográfico. Las sales se depositan en suspensión en una capa de gelatina. Cuando la luz incide sobre el compuesto, la plata y el bromuro se disocian (la molécula de Bromuro de plata se rompe y se separan los elementos). De este modo las zonas iluminadas (por la proyección del negativo) del papel fotográfico tras un proceso químico de revelado se contrastan del fondo tornándose oscuras o negras.

**Bulbo:** Es la parte del termómetro en el que se encuentra contenido el mercurio en ciertas clases de estos termómetros diseñado de color negro metálico para absorber la mayor radiación posible de la sustancia que está siendo medida, que es lo que se tiene como propósito al tomar la temperatura de un objeto.

## C

**CA:** Siglas de corriente alterna.

**Calor:** Energía en tránsito, debido a diferencia de temperaturas.

**Campo magnético:** Región del espacio donde se pueden detectar las fuerzas magnéticas en cada uno de sus puntos.

**Catalizador:** Una sustancia que acelera la reacción química, sin llevar a un cambio de los productos resultantes durante el proceso. Ahora utilizados en convertidores catalíticos para controlar la cantidad de hidrocarburos no quemados y CO en el escape de los automóviles.

**Cátodo:** Se denomina cátodo al electrodo negativo de una célula electrolítica hacia el que se dirigen los iones positivos, que por esto reciben el nombre de cationes.

**Cavitación:** Formación de una bolsa o burbuja de aire o vapor debido a una reducción en la presión de un fluido. El picado o el desgaste de la superficie es el resultado del colapso de la burbuja de vapor. La cavitación puede ocurrir en los sistemas hidráulicos como resultado de bajos niveles de aceite jalando aire hacia el sistema, produciendo pequeñas burbujas que se expanden explosivamente en la salida de la bomba, causando erosión del metal y ocasionalmente destrucción de la bomba.

**CC:** Siglas de Corriente Continua.

**Centro de Gravedad:** Es la representación de la masa de un cuerpo en un punto.

**Cepillado:** Operación mediante la cual se elimina metal de la superficie plana de una pieza de trabajo que se posiciona debajo de una herramienta fija de un solo filo.

**Ciclo:** Es un rango de valores en los cuales un fenómeno periódico se repite.

**Conductividad:** capacidad de un cuerpo de permitir el paso de la corriente eléctrica a través de sí.

**Corrientes de Eddy:** Corrientes eléctricas que fluyen en forma circular.

**Centipoises (cP):** Unidad absoluta de viscosidad. 1 centipoise = 0.01 poise.

**Centistoke (cSt):** Unidad de viscosidad cinemática. 1 centistoke = 0.01 Stoke.

**Conteo de partículas:** Cantidad de partículas mayores a cuatro micrones por unidad de volumen de fluido, con frecuencia se establece como partículas >10 micrones por mililitro.

**Control de contaminación:** Sistema de planeación, organización, administración e implementación de todas las actividades requeridas para determinar, alcanzar y mantener un determinado nivel de contaminación.

**Cople (acoplamiento):** Un conectar directo para líneas de fluido.

**Cuerpo negro:** Es un objeto teórico o ideal que absorbe toda la luz y toda la energía radiante que incide sobre él. Nada de la radiación incidente se refleja o pasa a través del cuerpo negro.

## D

**Decibel:** Unidad logarítmica de amplitud medida (muy usada en vibraciones y acústica).

**Demulsibilidad:** La habilidad de un fluido que es insoluble en agua, para separarse del agua con la que ha sido mezclado en forma de emulsión.

**Densidad de flujo magnético:** en una región de un campo magnético es el número de líneas de flujo que pasan a través de una unidad de área perpendicular, en esa región. La unidad del flujo en el SI es el *weber* (Wb). La unidad de densidad de flujo debe ser entonces webers por metro cuadrado, que se re define como *tesla* (T). Una antigua unidad que todavía se usa hoy es el *gauss* (G)

**Densidad radiográfica:** es un determinante primordial de la cantidad de rayos que impresiona la placa radiográfica que, como cualquier otro negativo fotográfico, da un tono más oscuro mientras más rayos recibe. Este método diferencia netamente sólo algunos niveles de densidad: en un extremo está la densidad del calcio (hueso) que, al impedir el paso de los rayos, produce un color blanco en el negativo y, en el otro, la densidad del aire que permite el libre paso de los rayos, dando color negro; en medio existe una gama de grises que no siempre permiten diferenciar con claridad los tejidos blandos, la sangre, los líquidos y la grasa.

**Densitómetros:** es un dispositivo que mide el grado de oscuridad (densidad óptica) de un material semitransparente, o de una superficie reflectante; los hay por reflexión que miden la luz reflejada desde una superficie y por transmisión que miden materiales transparentes.

**Desgaste:** La pérdida de material de la superficie como resultado de una acción mecánica.

**Desmagnetizar:** Suele utilizarse el término inglés Degauss para hacer referencia a desmagnetizar; Existen dispositivos que eléctricos un aparato que elimina (o reduce considerablemente) la magnetización residual estos crean campos magnéticos dentro de la pieza magnetizada, desalineando los dominios magnéticos existentes.

**Desplazamiento:** Cambio de posición de un objeto o partícula de acuerdo a una sistema de referencia.

**Detergente:** Un detergente es un producto cuya composición ha sido establecida especialmente para una operación de limpieza mediante el desarrollo de los fenómenos de detegencia.

**Detegencia:** Proceso por el cual las suciedades son separadas del sustrato sobre el que estaban retenidas, y puestas en estado de disolución o dispersión.

**Diagnóstico:** Proceso por medio del cual se juzga el estado de una máquina.

**Discontinuidades de tipo laminar:** Son inclusiones no metálicas, poros o cavidades aplanadas durante el proceso de laminado en el acero. Se orientan en la dirección del rolado.

**Discontinuidades superficiales:** Se ven a simple vista, no importa su profundidad.

**Discontinuidades subsuperficiales:** Se encuentran en el interior del material y no alcanzan la superficie.

**Dispersante:** En lubricación, un término usualmente empleado intercambiable con detergente. Un aditivo, usualmente no metálico ("sin cenizas") que mantiene las partículas finas de materiales insolubles en una solución homogénea. Por lo tanto, las partículas no pueden asentarse y acumularse.

**Dispersión:** se produce cuando una onda sonora encuentra un obstáculo para seguir transmitiéndose.

**Dominio de la frecuencia:** Es la representación gráfica de la vibración en la cual se enfrentan Amplitud vs. Frecuencia.

**Dominio del tiempo:** Es la representación gráfica de una señal de vibración en la cual se enfrentan Amplitud vs. Tiempo.

**Dosímetros:** son pequeños aparatos portátiles capaces de detectar la cantidad de exposición a la radiación ambiente producto de los rayos alfa, gamma, y la radiación beta; así como da una lectura de alarma para salir de la exposición.

## E

**Eddyscope:** Instrumento analizador de corrientes de Eddy.

**Efecto de borde:** El campo electromagnético producido por una bobina de prueba excitada se extiende en todas las direcciones desde la bobina.

**Efecto pelicular:** En corriente continua, la densidad de corriente es similar en todo el conductor, pero en corriente alterna se observa que hay una mayor densidad de corriente en la superficie que en el centro.

**Efluente:** El fluido abandonando un componente.

**Emisividad:** Es la relación de radiación infrarroja emitida por un objeto, su capacidad para emitir dicha energía puede ser medida y de esta manera ajustar el valor en los termómetros infrarrojos

**Emitancia:** Cantidad de energía radiante, de una determinada longitud de onda, emitida por un cuerpo, por unidad de área.

**Emulsión:** Fina capa de sustancias químicas sensibles a la luz, adheridas a una base / soporte, que reaccionan en la exposición registrando una imagen.

**Emulsificador:** Sustancia para crear Una dispersión homogénea de dos fases líquidas diferentes.

**Enjuagado:** Consiste en un limpiado de manera superficial.

**Entrehierro:** Espacio de aire comprendido entre el Estator y el Rotor de un motor eléctrico.

**Esparcimiento:** Es la acción de esparcir, separar lo que está junto.

**Espectro:** Sinónimo de dominio de la frecuencia (mecánica); Es una sucesión ordenada de radiaciones electromagnéticas (termografía)

**Espectro infrarrojo:** Un gráfico de la energía infrarroja absorbida a varias frecuencias en la región del espectro infrarrojo. La muestra actual, el aceite de referencia y las muestras previas son usualmente comparados.

**Espectrometría infrarroja por Transformadas de Fourier (FTIR):** Una prueba donde se usa la absorción de luz infrarroja para evaluar los niveles de contaminación por hollín, sulfates, oxidación, nitro-oxidación, glicol, combustible y agua.

**Excentricidad:** Variación del centro de rotación del eje con respecto al centro geométrico del rotor.

**Exposímetros:** El exposímetro, es el fotómetro empleado en fotografía. Se trata de un dispositivo que da la medida de la exposición en EV (*exposure values*) o en combinaciones de diafragma/velocidad de obturación equivalentes. Aunque hoy día la gran mayoría de las cámaras llevan un exposímetro incorporado, los exposímetros manuales son un accesorio de gran utilidad, especialmente en situaciones de iluminación difícil.

## F

**Factor de Servicio:** Factor que corrige niveles normalizados, para máquinas que se encuentran a condiciones especiales de operación.

**Fase:** Es un retardo en el tiempo de dos señales, expresado en grados de rotación.

**Fatiga:** Tendencia de un material a romperse bajo deflexiones repetidas.

**Fatigado:** Una falla estructural de la media filtrante debida a la flexión causada por una cíclica diferencial de presión.

**Ferrita:** estructura cristalina que se encuentra en materiales cerámicos ferromagnéticos, compuestos por hierro, boro y bario, estroncio o molibdeno.

**Ferrografía:** Un método analítico de comprobar la salud de la maquinaria, mediante la cuantificación y examen de las partículas de desgaste suspendidas en el aceite lubricante.

**Ferromagnetismo:** fenómeno físico en el que se produce ordenamiento magnético de todos los momentos magnéticos de una muestra, en la misma dirección y sentido.

**Filtración:** El proceso físico o mecánico de separar materiales insolubles de un fluido, tal como aire o líquido, mediante la circulación del fluido a través de una media filtrante que no permite a las partículas pasar por ella.

**Fluido:** Una clasificación general incluyendo líquidos y gases.

**Fotón:** Partícula de la que está compuesta la luz. Se trata de la unidad de energía electromagnética.

**FTIR = Espectroscopia Infrarroja por Transformadas de Fourier:** Una prueba en la que la absorción de luz infrarroja es utilizada para determinar niveles de hollín, sulfatación, oxidación, nitración y contaminación por glicol, combustibles y agua.

**Frecuencia:** Es la inversa del período o el número de oscilaciones (ciclos) por unidad de tiempo.

**Frecuencia de engrane (GMF Gear Mesh Frequency):** Es la velocidad nominal del engranaje multiplicado por el número de dientes. La GMF es igual para piñón y engranaje.

**Frecuencia de falla de jaula (FTF):** Es la frecuencia de un rodamiento que se excita cuando se presenta deterioro en su jaula.

**Frecuencia de falla de elemento rodante (BSF):** Es la frecuencia de un rodamiento que se excita cuando se presenta un daño en algún elemento rodante.

**Frecuencia de falla de pista externa (BPFO):** Es la frecuencia de un rodamiento que se excita cuando se presenta un daño en la pista externa.

**Frecuencia de falla de pista interna (BPFI):** Es la frecuencia de un rodamiento que se excita cuando se presenta un daño en la pista interna.

**Frecuencia de línea (FL):** Es la frecuencia eléctrica de alimentación del motor. En América son 60 Hz y en Europa son 50 Hz.

**Frecuencia natural (Fn):** Es la frecuencia que presenta cada componente por su propia naturaleza y características. Esta frecuencia oscilará si es excitada por agente externo que opere a una frecuencia muy cercana.

**Frecuencia de paso de aspas (BPF):** Es el número de aspas o paletas de una bomba o ventilador por su velocidad de rotación.

## G

**G:** Unidades de aceleración de la gravedad. Equivale a  $9.80 \text{ m/s}^2$  y a  $32.2 \text{ pie/s}^2$ .

**Ganancia:** relación de transferencia entre la salida y la entrada de un sistema electrónico.

**Gray (Gy):** (En el Sistema Internacional) es una medida de la dosis absorbida. Como el rad, su equivalente en el sistema tradicional, puede utilizarse para cualquier tipo de radiación, y para cualquier material. Un Gray es igual a un Julio de energía depositado en un kilogramo de materia. Como el rad, no describe los efectos biológicos de la radiación. La dosis absorbida se expresa a menudo en centésimas de Gray o centigrays. Un Gy es equivalente a 100 rads.

**Gripaje:** Avería que se produce cuando dos piezas que actúan conjuntamente mediante rozamiento, una fija y otra móvil, se agarrotan o sueldan la una con la otra. Se debe a una deficiente lubricación. El más conocido es el del motor, especialmente el producido entre el pistón y el cilindro o entre los casquillos del cigüeñal.

## H

**Herramienta fija de un solo filo:** Máquina herramienta de un solo borde cortante.

**Horizontal:** Generalmente es la posición que se le da al sensor, que va perpendicular al sentido de la gravedad.

**Histéresis:** es el fenómeno que permite el almacenamiento de información en los imanes de los discos duros o flexibles de los ordenadores.

**HVL:** (Half Value Layer) Es el espesor de cualquier material donde el 50% de la energía incidente se ha atenuado y se le conoce como la capa de valor medio (HVL); esta se expresa en unidades de longitud como pueden ser los mm o cm. Este indicador es independiente de los fotones de energía y sirve para realizar cálculos de cuanta intensidad se requiere para atravesar un material en un porcentaje específico; el aumento de la penetración de una corriente de fotones se traducirá en un aumento de material de HVL.

**Hz:** Unidad más común de la frecuencia. Equivale a ciclos por segundo.

## I

**ICI:** Indicador de calidad de imagen.

**Ionizar:** Acción mediante la que un átomo queda cargado eléctricamente por la pérdida o ganancia de uno o más electrones.

**Imágenes térmicas:** captura de la radiación infrarroja emitida por el cuerpo bajo estudio.

**Impedancia Acústica:** se define como la razón entre la presión sonora y la velocidad de las partículas de un medio material.

**Impresión:** Es la acción de imprimir o dejar una huella marcando al ser presionada; también es un efecto que causa en un cuerpo otro extraño.

**Infrarrojo:** La radiación del espectro electromagnético de mayor longitud de onda que el rojo y de alto poder calorífico.



**Inducción electromagnética:** fenómeno que origina la producción de una fuerza electromotriz (f.e.m. o voltaje) en un medio o cuerpo expuesto a un campo magnético variable, o bien en un medio móvil respecto a un campo magnético estático.

**Inductancia:** se denomina inductancia,  $L$ , a la relación entre el flujo magnético,  $\Phi$  y la intensidad de corriente eléctrica  $I$ :

**Inhibidor:** Cualquier sustancia que reduce o previene las reacciones químicas de corrosión o de oxidación.

**Inhomogeneidad:** no uniformidad en la distribución de una determinada magnitud física o propiedad de un cuerpo físico o un sistema físico.

**Inmersión:** Introducción de algo en un líquido.

**Inoperante:** que no actúa.

**Isótopos:** Son todos aquellos átomos que teniendo el mismo número atómico, es decir, el mismo número de protones en su núcleo, poseen distinto número másico, es decir, distinto número de neutrones en su núcleo.

## L

**Ley de Ampere:** Establece la relación entre la corriente eléctrica y el campo magnético estático que ésta produce.

**Lift Off:** distancia mínima del defecto del material con la punta de prueba.

**Líneas de flujo:** Son la unidad del conjunto de las líneas de flujo que en conjunto se le denominan densidad de flujo, por ende también son perpendiculares al área que están travesando.

**Lipofílico:** Dícese de una sustancia que tiene afinidad por los aceites o grasas.

**Lodo:** Material insoluble formado como resultado de reacciones de deterioro en el aceite y contaminación del aceite o ambas.

**Longitud de onda:** Distancia entre picos y valles consecutivos en ondas periódicas.

**LP:** Siglas de Líquidos Penetrantes.

**Lubricación límite:** Forma de lubricación entre dos superficies en contacto sin el de una película lubricante completamente fluida. La lubricación límite puede ser más efectiva incluyendo aditivos en el aceite lubricante que provean una película de aceite más fuerte, previniendo fricción excesiva y posible escoriación. Hay varios grados de lubricación límite, dependiendo de la severidad del servicio.

**Lubricante:** Cualquier sustancia que se interpone entre dos superficies en movimiento relativo con el propósito de reducir la fricción y el desgaste entre ellas.

## M

**Magnetización:** es la densidad de momentos dipolares magnéticos.

**Magnetostrictivo:** propiedad de contraerse o expandirse por efecto de un campo magnético.

**Masa equilibrante:** Masa utilizada en balanceo, para contrarrestar la masa desbalanceadora.

**Material ferromagnético:** Son materiales que consisten de moléculas que son como imanes pequeños, tienen polos norte y sur e inducen un campo magnético. Originalmente estas moléculas tienen una orientación aleatoria. Esto causa que sus campos se cancelen entre si y parecen no tener propiedades magnéticas. Cuando se aplica una fuerza magnética

exterior las moléculas se alinean en el sentido de la fuerza exterior. Así los campos magnéticos se unen (suman) y estos materiales se comportan como imanes (están imantados).

**Micra:** Medida de longitud o distancia. Equivale a la milésima parte de un milímetro.

**Micrómetro:** Vea micrón.

**Micrón:** Una unidad de longitud. Un micrón = la millonésima parte del metro, = 0.000039". El tamaño de los contaminantes usualmente se describe en micrones. Hablando relativamente, un grano de sal de mesa es de cerca de 60 micrones, y el ojo puede ver partículas de hasta 40 micrones. Muchos filtros hidráulicos requieren ser ían eficientes en capturar un porcentaje sustancial de partículas contaminantes tan pequeñas como 5 micrones. Un micrón es también conocido como un micrómetro y se representa como u.m.

**Mil:** Medida de longitud o distancia. Equivale a una milésima de pulgada.

**MiliRem:** Son milésimas de rem, mayor detalle ver rem.

**Morfología:** disciplina que estudia la generación y las propiedades de la forma de los materiales.

**mSv/h:** Es una unidad que describe la millonésima de un Sievert por hora. Mayores detalles en Sievert.

## N

**Negatoscopio:** El negatoscopio consiste en un acomodo de tubos fluorescentes alimentados por un voltaje de alta frecuencia y una pantalla difusora de luz, que normalmente es de acrílico, que en conjunto proporcionan una iluminación estándar para la correcta observación de los estudios de imagenología y rayos X impresos en placas radiográficas.

**Número ácido (AN antes TAN):** La cantidad de base, expresada en miligramos de hidróxido de potasio que se requiere para neutralizar todos los componentes ácidos presentes en un gramo de muestra. (ASTM D974).

**Número básico (BN antes TBN):** La cantidad de ácido, expresada en miligramos de hidróxido de potasio que se requiere para neutralizar todos los componentes básicos presentes en un gramo de muestra. (ASTM D974).

## O

**Oleosa:** Sustancia con base aceite, o es graso o grasiento.

**Onda en el tiempo:** Es la representación instantánea de una señal dinámica con respecto al tiempo.

**Orden:** Es otra de las unidades de frecuencia, utilizadas para maquinaria rotativa. Una orden es equivalente a la velocidad nominal de la máquina.

**Oscilación (ciclos):** cambio periódico de la condición o el comportamiento de un cuerpo.

**Oxidación:** Ocurre cuando el oxígeno ataca los fluidos minerales. El proceso es acelerado por calor, luz, catalizadores metálicos y la presencia de agua, ácidos o contaminantes sólidos. Esto lleva a un incremento en la viscosidad y formación de depósitos.

## P

**Palpador:** dispositivo de contacto que forma parte de un detector o de un instrumento de medición.

**Período:** Es el tiempo necesario para que ocurra una oscilación o se complete un ciclo. Generalmente está dada en minutos o segundos.

**Permeabilidad:** capacidad de una sustancia o medio para atraer y hacer pasar a través suyo los campos magnéticos, la cual está dada por la relación entre la intensidad de campo magnético existente y la inducción magnética que aparece en el interior de dicho material.

**Piezoeléctrico:** es un fenómeno presentado por determinados cristales que al ser sometidos a tensiones mecánicas adquieren una polarización eléctrica.

**Pico:** Cada una de las líneas que componen el espectro.

**Pitting:** Una forma de ataque extremadamente localizada que se caracteriza por orificios en el metal. Pitting es una de las formas más destructivas e insidiosas de corrosión. Dependiendo del entorno y del material, a un agujero le puede tomar meses o aún años para que sea visible.

**Posemulsificables:** Son sustancias que pueden utilizar solvente en agua o en aceite; dependerá de la sensibilidad y de la rapidez de la inspección su nombre se debe a que se debe de esperar un tiempo para que se lleve a cabo la emulsión.

**Pulsación:** Elevación y caída en la amplitud de vibración causada por dos fuentes de vibración que están a frecuencias muy cercanas.

## R

**Rad:** Es una unidad de medida de la dosis de radiación absorbida. Se relaciona con la cantidad de energía absorbida por un material, y puede ser utilizada para cualquier tipo de radiación y para cualquier material. Se define como la absorción de 100 ergios por gramo de material. A pesar de las ventajas reseñadas, no describe los efectos biológicos de las diferentes radiaciones.

**Radial:** Posición del sensor que va perpendicular a la línea del eje.

**Radioactividad:** es un fenómeno físico natural, por el cual algunos cuerpos o elementos químicos llamados radiactivos, emiten radiaciones que tienen la propiedad de impresionar placas fotográficas, ionizar gases, producir fluorescencia, atravesar cuerpos opacos a la luz ordinaria, etc.

**Radiografía:** Es una imagen registrada en una placa o película fotográfica. La imagen se obtiene al exponer dicha placa o película a una fuente de radiación de alta energía, comúnmente rayos X o radiación gamma procedente de isótopos radiactivos

**Radiólogo:** persona especializada con conocimientos especiales en diagnóstico mediante la interpretación de radiografías de rayos X, gammagrafía, ultrasonido, TAC, Resonancia Magnética y otro tipo de estudios por imágenes.

**Reflectancia:** La medida de la reflexión es la *reflectancia*; se define como la relación entre el flujo luminoso reflejado y el flujo luminoso incidente.

**Rem:** Es una unidad utilizada para cuantificar los efectos biológicos de la radiación. No todas las radiaciones tienen el mismo efecto biológico, incluso con la misma cantidad de dosis absorbida. Para determinar la dosis equivalente -rem - hay que multiplicar la dosis absorbida en rads por un factor de calidad q, propio de cada tipo de radiación. Para las radiaciones electromagnéticas, el rad y el rem coinciden en su valor, puesto que se les asigna un valor q de 1. Las dosis suelen expresarse en términos de milésimas de rem, o mrem.

**Remoción:** Remover o removerse.

**Removedores:** Agente para quitar, apartar o remover.

**Resonancia:** Se presenta cuando la frecuencia natural de un componente es excitada por un agente externo.

**Revelador:** Polvo revelador que se encuentra en una solución líquida cuando esta envasado; cuando se aplica y este se seca revela o muestra, imperfecciones.

**RI:** Siglas de Radiografía Industrial.

**Roetgens:** Es una unidad utilizada para la medición de la exposición a la radiación. Solamente puede ser usada con propiedad para medir cantidades de radiación ionizante electromagnética, es decir, rayos gamma o X, y solamente en el aire. Un roentgen es la energía radiante que deposita  $2.58 * 10^4$  culombios por kilogramo de aire seco. Es realmente una medida de la ionización existente en las moléculas de una masa de aire. A pesar de las mencionadas limitaciones, la ventaja de esta unidad es que es fácil de medir de forma directa.

**Rotor Flexible:** Son rotores que giran muy cerca o por encima de su primera velocidad crítica. Por sus condiciones de operación presentan una deformación significativa.

**Rotor rígido:** Rotor que no se deforma significativamente cuando opera a su velocidad nominal.

**RPM:** Otra de las unidades de frecuencia. Equivale al número de ciclos por minuto que presenta la máquina.

**RPS:** Otra de las unidades de frecuencia. Equivale a 1 Hz (ciclos por segundo).

**Rugosidad superficial:** Es la superficie que tiene una especie de arrugas o esta arrugada, es decir carece de una superficie plana.

**Ruido:** Es información de la señal que no representa alguna importancia. Representa contaminación de la señal.

**Ruido de piso o blanco:** Es el límite más bajo de sensibilidad de un instrumento de medición electrónico, expresado en micro-voltios (10-6V). Se localiza a través de todo el espectro.

## S

**Sievert (Sv):** (También en el Sistema Internacional) es una unidad utilizada para describir la dosis equivalente en efectos biológicos. Es pues paralela al rem, y equivalente a 100 rem. A menudo debe utilizarse en unidades fraccionarias, hasta de millonésimas de Sievert, o micro-Sievert.

**Sedimentos:** Partículas contaminantes de un tamaño de 5 micrones o menos.

**Segundos Saybolt Universales SSU:** El tiempo en segundos requerido para que una muestra de 60 centímetros cúbicos de aceite fluya a través de un orificio estándar del viscosímetro Saybolt Universal a una temperatura dada en las condiciones de la prueba (ASTMD88).

**Sensor:** Es un dispositivo de medición que transforma una variable física en una señal eléctrica. En nuestro caso pasa de una señal física de vibración y la convierte en una señal eléctrica.

**Señal:** Es toda información de magnitud física variable que se convierte a magnitud eléctrica mediante un transductor.

**Solvente:** Son sustancias orgánicas en estado líquido, utilizadas para disolver sólidos o gases u otros líquidos. La mayoría de ellos son derivados del petróleo o sintéticos.

**Soluble:** Que se puede disolver o desleír.

**Spray:** Envase de algunos líquidos mezclados con un gas a presión, de manera que al oprimir una válvula salga el líquido pulverizado; también se escribe espray.

**Subarmónicos:** Son frecuencias que se encuentran a una fracción fija de una frecuencia fundamental, como la velocidad nominal de la máquina.

**Suspensión acuosa:** Compuesto que resulta de disolver cualquier sustancia en agua.

## T

**Termografía:** Registro gráfico del calor emitido por la superficie de un cuerpo en forma de radiaciones infrarrojas, que tiene aplicaciones médicas, técnicas, etc.

**Transductor:** dispositivo capaz de transformar o convertir un determinado tipo de energía de entrada, en otra de diferente a la salida.

**Transformada Rápida de Fourier (FFT):** Es una técnica para calcular por medio de un computador la frecuencia de las series que conforman la onda en el dominio del tiempo.

**Transmisión:** Acción y efecto de transmitir.

**Tratamiento:** Acción y resultado de tratar. Procedimiento empleado para la preparación de la pieza.

## V

**$V=\lambda F$ :** Ecuación que describe la velocidad de la onda; donde F es la frecuencia y  $\lambda$  es la longitud de onda.

**Vector:** Es una cantidad dotada de magnitud y dirección.

**Velocidad:** Razón de cambio del desplazamiento respecto al tiempo.

**Velocidad nominal:** Velocidad de entrada de una máquina.

**Vertical:** Posición que se le da al sensor, que va en el sentido de la aceleración de la gravedad.

**Vertido:** Derramamiento o vaciado de líquidos o algo semejante.

**Víscómetro o viscosímetro:** Un aparato para determinar la viscosidad de un fluido.

**Vibración:** Es un movimiento oscilatorio.

**Vibración Aleatoria:** Frecuencias que no cumplen con patrones especiales que se repiten.