

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA
ESCUELA DE INGENIERIA QUIMICA



**“Evaluación de los Parámetros de Operación en
Procesos de Agitación y Mezcla de Fluidos No-
Newtonianos con Especificación en Formulación de
Aceites Lubricantes”.**

PRESENTADO POR:

TANIA CECILIA MADRID CORNEJO

PARA OPTAR AL TITULO DE:
INGENIERA QUIMICO

CIUDAD UNIVERSITARIA, SEPTIEMBRE DE 2003.-

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA
ESCUELA DE INGENIERIA QUIMICA

Trabajo de Graduación previo a la opción al grado de:
INGENIERA QUIMICO

Titulo:

**“Evaluación de los Parámetros de Operación en
Procesos de Agitación y Mezcla de Fluidos No-
Newtonianos con Especificación en Formulación de
Aceites Lubricantes”.**

Presentado por :

Tania Cecilia Madrid Cornejo

Trabajo de Graduación aprobado por:

Docente directora :

M.Sc. Delmy Del Carmen Rico Peña

Docente directora :

Inga. Tania Torres Rivera

San Salvador, SEPTIEMBRE de 2003.

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR

RECTORA :

Dra. María Isabel Rodríguez

SECRETARIA GENERAL :

Licda. Lidia Margarita Muñoz Vela

FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA

DECANO :

Ing. Álvaro Antonio Aguilar Orantes

SECRETARIO :

Ing. Saúl Alfonso Granados

ESCUELA DE INGENIERIA QUIMICA

DIRECTORA :

Inga. Eugenia Gamero Rodríguez

Trabajo de Graduación Aprobado por:

Docentes Directoras :

M.Sc. Delmy Del Carmen Rico Peña

Inga. Tania Torres Rivera

AGRADECIMIENTOS

Extiendo mi más sincero agradecimiento por la colaboración y apoyo brindado en la realización del presente trabajo de graduación, por colaborar incesantemente en la obtención de los resultados y por compartir este triunfo.

Inga. Tania Torres Rivera

M.Sc. Delmy Del Carmen Rico Peña

Ing. Roberto Salvador López

Ing. Fernando Teodoro Ramírez Zelaya

Sr. Fredy Elmer Madrid Martínez

Sra. Sandra Lorena Recinos

Srta. Ivett Guadalupe Madrid Cornejo

Y a todas aquellas personas que colaboraron de una u otra forma

Gracias,

Tania Cecilia

RESUMEN

El desarrollo del siguiente estudio pretende apoyar el avance de técnicas de laboratorio con aplicación en la dinámica de fluidos y procesos de agitación y mezcla, que contribuyan en la enseñanza de asignaturas de la Carrera de Ingeniería Química.

Por tanto, se proyecta diseñar un modelo empírico del tiempo de mezclado, y generar documentación sobre la reología de fluidos no newtonianos para que se pueda aplicar en estudios posteriores. Así como la creación de un documento, sobre un proceso de agitación y mezcla específico, que contenga los parámetros a evaluar durante la investigación.

El objeto de estudio es entender las propiedades de fluidos no-newtonianos y su aplicación específica en procesos de agitación y mezcla. Haciendo uso de las propiedades y características de calidad propias del proceso de producción, se inicia realizando un análisis para conocer las condiciones del proceso, lo que conlleva a la elaboración de un diagnóstico descrito en la sección cinco.

El estudio se realiza por medio del análisis de una de las características de calidad, como es la viscosidad cinemática del producto terminado, por tal motivo se inicia la investigación con el diagnóstico de esta variable de calidad y de otros factores que influyen como son, el tiempo total de mezclado (60-90 minutos), la velocidad de giro del rodete del tanque (450-550 rpm), y finalmente la temperatura de mezclado (80-90 °F). Por tanto, para determinar causas que afecten los procesos de agitación y mezcla se inicia con el diagnóstico del proceso a través del cual se hace la evaluación del Índice de Capacidad, para la variable viscosidad cinemática de cada uno de los aceites involucrados en el estudio.

Es por eso que el valor de CP, obtenido para un Aceite Automotriz es de 1.208, lo que indica que este proceso resulta ser adecuado, pero al realizar el índice de capacidad del proceso (C_p), para el tiempo de mezclado del tanque, se tiene que es de 0.214, demostrando que el proceso no es capaz de cumplir

con el tiempo de mezclado especificado, para las condiciones de viscosidad cinemática requeridas por el proceso.

De la misma forma se evaluó por medio del análisis de histogramas la elaboración de un Aceite tipo Marino, obteniendo un valor de CP para el tanque B de 0.680, indicando que el proceso de agitación y mezcla no es capaz de producir un aceite con la viscosidad cinemática especificada, siendo también el índice de capacidad del proceso (C_p), para el tiempo de mezclado de, 0.189. De igual forma para el tanque C el valor de CP es 0.644.

Ya que para que nuestro proceso sea adecuado se deben tener valores de CP mayores o iguales a 1.33. De esta manera se tiene una visión amplia de las diferentes causas que afectan el proceso pudiendo tener así la base para realizar la parte experimental de la investigación.

La realización de la etapa experimental nos permitió conocer factores que inciden en la calidad del producto y que están involucrados directamente en su elaboración, como es el caso de la variabilidad en la viscosidad, la cual se ve afectada por diferentes efectos, como por ejemplo el valor significativo más alto para el factor X_1 (velocidad de giro del rodete).

Además a partir del diseño se determinó cada ecuación que se ajusta al modelo propuesto, siendo para el aceite tipo automotriz:

Los métodos utilizados son probabilísticos o estadísticos y son justificados en base a la recopilación de datos de viscosidad que ayudan en la elaboración del diagnóstico del proceso. Y la elaboración de la etapa experimental que permite la comprobación de cada efecto sobre las variables de calidad involucradas en el sistema, y que son importantes para el desarrollo de la investigación.

INDICE

Introducción	1
1.0 Los aceites lubricantes, su origen y proceso de producción	3
1.1 Manufactura de bases lubricantes	4
1.1.1 Producción de lubricantes	5
1.1.2 Materias constituyentes de aceites lubricantes	6
1.1.3 Aditivos para aceites lubricantes	6
1.1.4 Bases de los lubricantes minerales	7
1.2 Proceso de producción de aceites lubricantes	9
1.2.1 Pruebas físicas y químicas	11
1.2.2 Homogeneidad y compatibilidad	11
1.2.3 Fundamentos de agitación y mezcla	12
1.3 Tipo de Lubricación	13
1.3.1 Funcionamiento de los aceites multigrados	14
1.3.2 Clasificación ISO Y SAE para Lubricantes	17
1.3.3 Lubricación en la capa limite	18
1.4 Parámetros de calidad para aceites lubricantes	20
1.4.1 Viscosidad	20
1.4.2 Viscosidad cinemática	24

2.0	La Industria de Lubricantes a Nivel Mundial	26
2.1	Antecedentes Históricos	26
2.2	Estadística de Comercio Exterior para importaciones y exportaciones en El Salvador	28
3.0	Características Reológicas de Fluidos No-Newtonianos	31
3.1	Caracterización desde el punto de vista Reológico De Aceites Lubricantes	40
3.1.1	Parámetros físicos Aplicados en Reología Para Aceites Lubricantes	42
4.0	Ecuaciones Aplicadas para Describir el Comportamiento de Fluidos No Newtonianos	45
5.0	Plan de la investigación para la evaluación de las Características De Calidad en Procesos de Agitación y Mezcla en Fluidos No Newtonianos	50
5.1	Diagnóstico de Procesos de Agitación y Mezcla en Fluidos No Newtonianos con especificación en Aceites Lubricantes	51

5.1.1	Análisis de Procesos de agitación y mezcla para fabricación de Aceite Automotriz	52
5.1.2	Análisis General de procesos de agitación y mezcla para fabricación de Aceite tipo Marino	55
5.1.3	Análisis de Procesos de agitación y mezcla para fabricación de Aceite tipo Marino	57
5.1.4	Análisis de Procesos de agitación y mezcla para fabricación de Aceite tipo Marino	60
5.2	Diagrama Causa-Efecto para procesos de agitación y mezcla con especificación en Aceites Lubricantes	62
6.0	Desarrollo de la etapa experimental	67

6.1	Descripción del proceso de Agitación y Mezcla a nivel de laboratorio	68
7.0	Análisis de variables para definir Operaciones de Agitación y mezcla en Fluidos No Newtonianos	69
7.1	Variables Experimentales que afectan el proceso de reacción	69
7.2	Descripción de Variables respuesta	70
7.3	Diseño Factorial en la Evaluación de proceso de Agitación y mezcla	70
7.3.1	Diseño de Factores, Niveles y la Matriz de diseño	70
7.4	Análisis de significancia de efectos	72
7.5	Análisis de los resultados de cada efecto aplicado a cada aceite analizado	75
7.5.1	Análisis para aceite Tipo Marino	75
7.5.2	Análisis para aceite Tipo automotriz	76

7.6	Análisis e Interpretación de Resultados	76
7.6.1	Prueba de Idoneidad para el experimento	80
	Conclusiones	87
	Recomendaciones	88
	Referencias	89
	Anexos	91
Anexo A,	Procesos de mejora y su aplicación estadística a procesos de agitación y mezcla	92
Anexo B,	Teoría general Estadística	95
Anexo C,	Cuadros de Datos obtenidos del Proceso	103
Anexo D,	Cuadros de cálculos para el diagnóstico del proceso a partir del análisis de los datos	106

INDICE DE CUADROS

Cuadro 3.1: Exportaciones en El Salvador, para preparaciones de lubricantes	28
Cuadro 3.2: Exportaciones en El Salvador, para aceites y grasas Lubricantes	29
Cuadro 3.1: Importaciones en El Salvador, para preparaciones de lubricantes	30
Cuadro 5.1: Estadísticos para la viscosidad cinemática, en tanque A	53
Cuadro 5.2: Estadísticos para el tiempo total de mezcla, en tanque A	54
Cuadro 5.3: Estadísticos para la viscosidad cinemática, en tanque B	57
Cuadro 5.4: Estadísticos para el tiempo total de mezclado, en tanque B	59

Cuadro 5.5: Estadísticos para la viscosidad cinemática, en tanque C	61
Cuadro 5.6: Estadísticos para el tiempo total de mezclado, en tanque C	62
Cuadro 7.1: Descripción de variables involucradas en el proceso	70
Cuadro 7.2: Factores y niveles para procesos de Agitación y Mezcla	72
Cuadro 7.3: Codificación de los factores para procesos de agitación y mezcla en aceites de tipo automotriz y marino	72
Cuadro 7.4: Constantes de contraste para el diseño 2k	74
Cuadro 7.5: Datos recolectados a partir del diseño experimental para un aceite de tipo automotriz	74
Cuadro 7.6: Datos recolectados a partir del diseño experimental para un aceite de tipo marino	74
Cuadro 7.7a: Cálculos de los efectos para los datos del diseño de experimentos (Aceite marino)	74
Cuadro 7.7b cálculos de los efectos para los datos del diseño de experimentos (Aceite automotriz)	75

Cuadro 7.8: Efecto principal para cada factor del proceso	75
Cuadro 7.9: Efecto principal para cada factor del proceso	76
Cuadro 7.10: Algoritmo de Yate, para K=3 de un aceite tipo automotriz	77
Cuadro 7.11: Algoritmo de Yate, para K=3 de un aceite tipo marino	77
Cuadro 7.12: Calculo de residuos para un aceite tipo automotriz	81
Cuadro 7.13: Calculo de residuos para un aceite tipo marino	81
Cuadro 7.14: Análisis de significancia de los parámetros del modelo para un tipo automotriz	79
Cuadro 7.15: Análisis de varianza del modelo para un aceite tipo automotriz	79
Cuadro 7.16: Análisis de significancia de los parámetros del modelo para un tipo marino	81
Cuadro 7.17: Análisis de varianza del modelo para un aceite tipo marino	81
Cuadro C.1: Datos recolectados tanque A, del proceso para el Diagnostico	99

Cuadro C.2: Datos recolectados tanque B, del proceso para el Diagnostico 100	
Cuadro C.3: Datos recolectados tanque C, del proceso para el Diagnóstico	101
Cuadro D.1: Datos de Diagnóstico para tanque A (viscosidad)	102
Cuadro D.2: Diagnostico tanque A, con respecto al tiempo de Mezcla	102
Cuadro D.3: Diagnostico forma general para aceite de especificación marina	103
Cuadro D.4: Diagnostico para tanque B (viscosidad)	103
Cuadro D.5: Diagnostico para tanque B (tiempo)	103
Cuadro D.6: Diagnostico para tanque C (viscosidad)	104
Cuadro D.7: Diagnostico para tanque C (tiempo)	104

INTRODUCCION

En los procesos de elaboración de un producto, se necesita controlar aspectos de calidad, que permiten el mejoramiento continuo del proceso.

La combinación de diversos materiales y la composición de estos en tanques cilíndricos, por medio de movimientos físicos, para obtener un producto de la misma naturaleza química que cumple con requisitos de calidad, llevan a un conjunto de operaciones como la agitación y mezcla.

Datos químicos de diversas reacciones de tipo físico, se basan en la investigación experimental de los procesos de agitación y mezcla. Estas investigaciones se realizan por medio de diseños factoriales, a nivel de laboratorio que permitirán conocer parámetros involucrados en la mejora de estos procesos.

En los últimos años ha existido gran interés en el comportamiento reológico que presentan sistemas simples en situaciones extremas, por ejemplo podemos mencionar el engrosamiento o adelgazamiento de la viscosidad cuando la razón de corte es apreciable que se manifiesta en una viscosidad dependiente de la razón de corte (viscosidad no lineal). Por tal razón los estudios realizados pueden tener importancia en la extracción del petróleo, más concretamente en la elaboración de aceites lubricantes.

Al comenzar el estudio fue necesario conocer cierta información involucrada, como tiempos de mezclado, viscosidad cinemática de la mezcla y temperatura del proceso, con aplicación en aceites lubricantes de tipo no-newtoniano.

Toda investigación experimental demanda la aplicación de análisis estadístico, que permita conducir la investigación a niveles más eficientes.

Además de realizar un diagnóstico general del proceso de agitación y mezcla de aceites lubricantes, y de que se determinara el estado general del proceso.

A continuación se expone los conceptos básicos de la teoría de fluidos no-newtonianos y de los tipos de aceites lubricantes, el diagnóstico del proceso general para la elaboración de aceites, análisis del diseño estadístico, las cuales serán las principales herramientas en el diagnóstico y optimización de procesos de agitación y mezcla.

1.0 LOS ACEITES LUBRICANTES, SU ORIGEN Y PROCESO DE PRODUCCION

Un lubricante es toda sustancia sólida, semisólida o líquida de origen animal, vegetal, mineral o sintético que puede utilizarse para reducir el rozamiento entre piezas y mecanismos en movimiento.

Los lubricantes son materiales puestos en medio de partes en movimiento con el propósito de brindar enfriamiento (transferencia de calor), reducir fricciones, limpiar los componentes, sellar el espacio entre los componentes, aislar contaminantes y mejorar la eficiencia de operación.

Si dos superficies metálicas secas, están en contacto bajo presión y moviéndose una con respecto a la otra, ocurre una fricción excesiva, calentamiento y desgaste. Si un fluido se mantiene entre dichas superficies de contacto, de tal manera que no se toquen los metales, entonces las pérdidas por fricción son despreciables.

El lubricante ideal deberá ser lo suficientemente viscoso para mantener las superficies apartadas, permanecer estable bajo los cambios de temperatura, mantener limpias las superficies lubricadas y no deberá ser corrosivo.

Los lubricantes en base a su origen se pueden dividir en tres grandes categorías: aceites orgánicos, aceites minerales, y lubricantes sintéticos.

a) Aceites orgánicos

Que son los aceites grasos y aceites fijos. Químicamente se clasifican en el grupo de los lípidos, derivándose de un sólo alcohol el glicerol, al cual se encuentran esterificadas moléculas de ácidos carboxílicos, dando origen a los acilgliceridos y en algunos casos a fosfolípidos. Los aceites orgánicos se oxidan fácilmente, forman ácidos grasos libres, volviéndose rancios (CASTRO MEJIA, 1999).

b) Aceites minerales

Los aceites minerales se obtienen directamente del petróleo crudo por destilación al vacío, los aceites obtenidos son de base parafínica, nafténica, o de base mixta.

La combinación de éste aceite mineral y un jabón o mezcla de jabones apropiados para ciertas aplicaciones de lubricantes, constituyen las llamadas grasas que también tienen un uso muy generalizado en los procesos de lubricación. El aceite mineral es una mezcla de cientos de hidrocarburos diferentes, teniendo cada uno propiedades individuales. Después de una refinación adecuada para eliminar constituyentes indeseables, el lubricante puede ser clasificado generalmente como nafténico o parafínico (CASTRO MEJIA, 1999).

c) Lubricantes sintéticos

Son líquidos aceitosos formados por cadenas de polímeros derivados del petróleo que por la estructura química que presentan, tienen muchas propiedades requeridas en lubricación. Mediante procesos de catálisis, destilación, hidrogenación y filtración se obtienen como productos los lubricantes sintéticos como son: ésteres, poliésteres, poliglicoles, polialfaolefinas y alquilatos aromáticos (CASTRO MEJIA, 1999).

1.1 Manufactura de bases lubricantes

En la manufactura del aceite lubricante el crudo es primeramente destilado o fraccionado, eliminando los hidrocarburos más volátiles, tales como la gasolina, kerosén y el aceite combustible destilado, quedando las fracciones de aceite más pesadas de las que se obtienen los aceites lubricantes. Usando refinamiento con solventes, tratamiento ácido, filtración desencerrado y fraccionamiento adicional, los constituyentes indeseables son eliminados, dejando solamente aquellos hidrocarburos que no son perjudiciales, sino por el contrario son deseables para llenar los requisitos que exige la lubricación de algunas clases particulares de máquinas.

A los hidrocarburos se les puede clasificar como:

Parafínicos o saturados: son los ideales para elaborar aceites lubricantes. Aromáticos: dan naftas de buen valor octánico, indeseables para producir aceites. Nafténicos: son intermedios de los dos previamente mencionados. Por tanto, según el tipo de hidrocarburo que predomine en el

petróleo crudo, se establece el camino de procesamiento que se seguirá en la refinería.

1.1.1 Producción de lubricantes

En una refinería compleja, el residuo de la destilación atmosférica, llamado crudo reducido, se continúa fraccionando bajo vacío para seguir separando distintas fracciones sin modificar su estructura química, obteniendo cortes básicos para la elaboración de lubricantes. Este residuo es refinado con solvente en la unidad de Desasfaltado -donde se lo mezcla con propano líquido- para separar las resinas asfálticas y otros componentes que perjudican la calidad de los aceites. Luego se separa al propano del aceite y del asfalto. Posteriormente, se realiza la Refinación con furfural (sustancia que se mezcla en parte con el aceite mineral) donde se procesan -agitándolas- las diferentes bases, que salen por la parte superior, tras haber sido eliminados los compuestos aromáticos indeseables. Inmediatamente se realiza la separación del furfural utilizado. El paso posterior en la elaboración de lubricantes es la eliminación de parafinas (Desparafinado) que se realiza con solventes especial a bajas temperaturas. Las parafinas deben eliminarse para que los aceites se mantengan fluidos cuando trabajan a muy bajas temperaturas (CHEVRON, 2000).

El Tolueno, asegura la completa solubilidad del aceite y gran fluidez al filtrado. El Metil etil cetona es un compuesto parafínico "antisolvente" que asegura la precipitación de las parafinas al enfriarse. El aceite luego es filtrado y refrigerado. El solvente disuelto en ambas fases: aceite y parafina, se recupera, libre de compuestos aromáticos y parafinas, la base es enviada al hidroterminado catalítico, donde se pone en contacto al aceite con gas hidrógeno en presencia de un catalizador adecuado. Este es el último paso de la refinación de los aceites bases, en el que se logra:

- a) La eliminación del azufre.
- b) Mejorar la estabilidad.
- c) Mejorar la resistencia a la oxidación.

1.1.2 Materias constituyentes de aceites lubricantes

El aceite mineral es una mezcla de cientos de hidrocarburos diferentes, teniendo cada uno de ellos propiedades individuales. Únicamente ciertos hidrocarburos son aceptables como constituyentes de los de los aceites lubricantes. Después de un refinamiento adecuado para eliminar constituyentes indeseables, el lubricante puede ser clasificado generalmente como nafténico o parafínico.

Todos los tipos de lubricantes están constituidos por bases y aditivos. Al lubricante básico se le agregan aditivos antioxidantes y anti-corrosivos, anti-espumantes, etc. Los lubricantes son necesarios para brindar resistencia a la corrosión de los metales en los motores, ya que el lubricante esta en contacto, con diferentes partes del motor y es el encargado de proteger y proporcionar propiedades que den resistencia al motor.

1.1.3 Aditivos para aceites lubricantes

Son pequeños porcentajes de diferentes materiales solubles en aceites que se agregan a éstos, de manera tal que les impartan características que no se obtienen por el proceso de refinamiento.

A esos materiales se les llama comúnmente aditivos y existen varios tipos, los cuales según su función son: anti-oxidantes o inhibidores de oxidación, anti-corrosivos, preventivos de corrosión o anticatalíticos, detergentes, dispersantes, agentes de presión extrema, preventivos del moho, depresores del punto de congelación, mejoradores del índice de viscosidad, e inhibidores de espuma. Los aceites usados para lubricar pueden contener uno o más de los diversos tipos de aditivos, dependiendo del diseño de la máquina y de las condiciones de funcionamiento.

Los aditivos utilizados para la formulación de aceites lubricantes automotrices de acuerdo a su función son:

- a) ANTIDEGASTE: La finalidad de cualquier lubricante es evitar la fricción entre dos superficies que están en movimiento en forma encontrada, este aditivo permanece pegado a la superficie de las partes en movimiento,

formando una película de aceite, que evita el desgaste entre ambas superficies.

- b) MODIFICADORES DE FRICCIÓN: Estos permiten que las partes en movimiento se deslicen más rápidamente, permitiendo menos fricción, y en consecuencia importantes ahorros de consumo de combustible.
- c) DETERGENTES: Como su nombre lo indica, su función es lavar las partes interiores en el motor, que se ensucian por las partículas de polvo, tierra, etc., que entran al motor.
- d) DISPERSANTES: Este aditivo pone en suspensión las partículas que el aditivo detergente lavó y las disipa en millones de partes (CASTRO, 1999).

En forma resumida, y en función de los tipos de aditivos se puede decir que la función del aceite lubricante es: **lubricar, enfriar, sellar y lavar**. Un buen aceite además de lubricar debe, actuar como enfriador, disminuyendo la alta temperatura del motor. Por otra parte debe de actuar como sello para impedir fugas, y actuar como detergente, para mantener limpio el motor, ayudado por otro aditivo que permita mantener en suspensión y dispersar las partículas contaminantes acumuladas, tales como el polvo y la tierra (SHELL COMPANY, 2000).

1.1.4 Bases de los lubricantes minerales

Las bases de los lubricantes minerales son las que determinan la mayor parte de las características del aceite, tales como: viscosidad, índice de viscosidad, resistencia a la oxidación, punto de inflamación y de fluidez, etc. De acuerdo con el tipo de crudo, la base lubricante puede ser: parafínica, nafténica o aromática.

a) Bases parafínicas

Contienen porcentajes de hidrocarburos parafínicos del 75% o mayores. Son relativamente estables a altas temperaturas, pero por el alto contenido de parafina que poseen, no funcionan satisfactoriamente a bajas temperaturas. Sus características más importantes son:

- i. Alto índice de viscosidad, indicadas donde hay cambios de temperatura, debido a que varía muy poco su viscosidad.
- ii. Bajo grado de oxidación. Cuando se encuentran sometidas a altas temperaturas, permanece sin deteriorarse apreciablemente durante largos periodos de tiempo.
- iii. Baja volatilidad
- iv. Bajo poder disolvente
- v. Alto punto de congelación, debido al elevado porcentaje de parafinas que poseen.

b) Bases nafténicas

Contienen porcentajes de hidrocarburos nafténicos del 70% o mayores. A altas temperaturas son menos estables para las parafinas, contienen una mínima cantidad de parafina, por lo tanto, no forman ceras a bajas temperaturas y permanecen en estado líquido. Las moléculas forman ciclos de cinco y de seis átomos. Sus características más importantes son:

- i. Bajo índice de viscosidad
- ii. Alto poder disolvente natural
- iii. Reducida tendencia a la formación de carbón. Cuando se queman, el carbón residual es blanco y escaso.
- iv. Bajo punto de fluidez.
- v. Alta volatilidad

c) Bases Aromáticas

Estas bases no se utilizan en la fabricación de aceites lubricantes debido a que no presentan prácticamente ninguna característica que amerite su implementación. Su viscosidad disminuye rápidamente con la temperatura y presentan tendencia a la formación de gomas a altas temperaturas. Su estructura molecular está constituida por ciclos de doble ligadura, parecidas a las del benceno. Sus características más importantes son:

- i. Índice de viscosidad muy bajo.
- ii. Alta volatilidad.
- iii. Se oxidan fácilmente
- iv. Tendencia a formar gomas y resinas.
- v. Se emulsionan fácilmente con agua.

1.2 Proceso de producción de aceites lubricantes

Su elaboración inicia al recibirse los aceites básicos en los tanques de almacenamiento de la planta que va a elaborarlos, de esto depende el volumen que se requiere producir o la viscosidad a obtener, se envían generalmente a un tanque o tina de mezclado, en este recipiente, se reciben los aceites básicos y se les adicionan los aditivos requeridos (ANTIDESGASTE, MODIFICADORES DE FRICCIÓN, DETERGENTES y DISPERSANTES), (Ver figura 1.1). Este tanque de mezclado, generalmente tiene un sistema de calentamiento y agitación para realizar una mezcla homogénea del producto. Los rangos de tiempo varían entre una y ocho horas de agitación dependiendo de las dimensiones del tanque, el volumen a mezclar y del tipo de aceite que se este mezclando; la velocidad de giro de rodete depende de las especificaciones propias de cada tanque de mezcla y puede estar en un rango 450-1000 rpm.

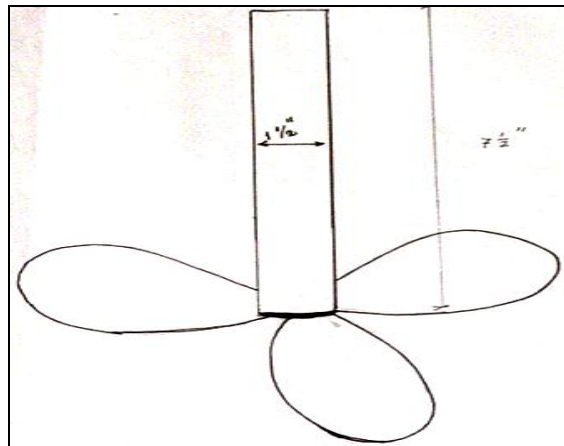


FIGURA 1.1 SISTEMA DE AGITACION TIPICO, PARA MEZCLAS DE FLUIDOS NO-NEWTONIANOS

El sistema de agitación en tanques cilíndricos de base cóncava, constan de rodetes alineados verticalmente, un pie arriba del fondo, cada uno con sistemas de tres hélices, montados en tanques de diámetro y altura similares, pero con capacidades volumétricas diferentes.

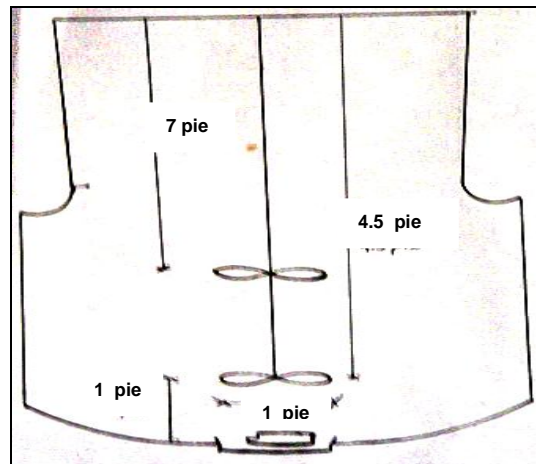


FIGURA 1.2 SISTEMA DE AGITACION TIPICO, DE TANQUES DONDE SE MEZCLAN DE FLUIDOS NO-NEWTONIANOS

Una vez realizada la mezcla, se remite una muestra a un laboratorio especializado en la investigación de aceites lubricantes para su análisis (ver secciones 1.2.1 y 1.2.2), y ya aprobado se envía a los tanques de producto terminado para posteriormente proceder a su venta, a granel, o envasado (SHELL BRIEFING SERVICE, 2001).

Es conveniente hacer la aclaración, que cuando se discute de aditivos que se utilizan en la formulación de aceites lubricantes, se habla sobre productos que se obtienen mediante la utilización de una química avanzada, de años de estudio, pruebas de campo y desarrollo tecnológicos, que de acuerdo al avance de la industria automotriz, permiten utilizarlos en formulaciones que cumplen los últimos requerimientos de lubricación solicitados por los fabricantes de vehículos en el ámbito mundial.

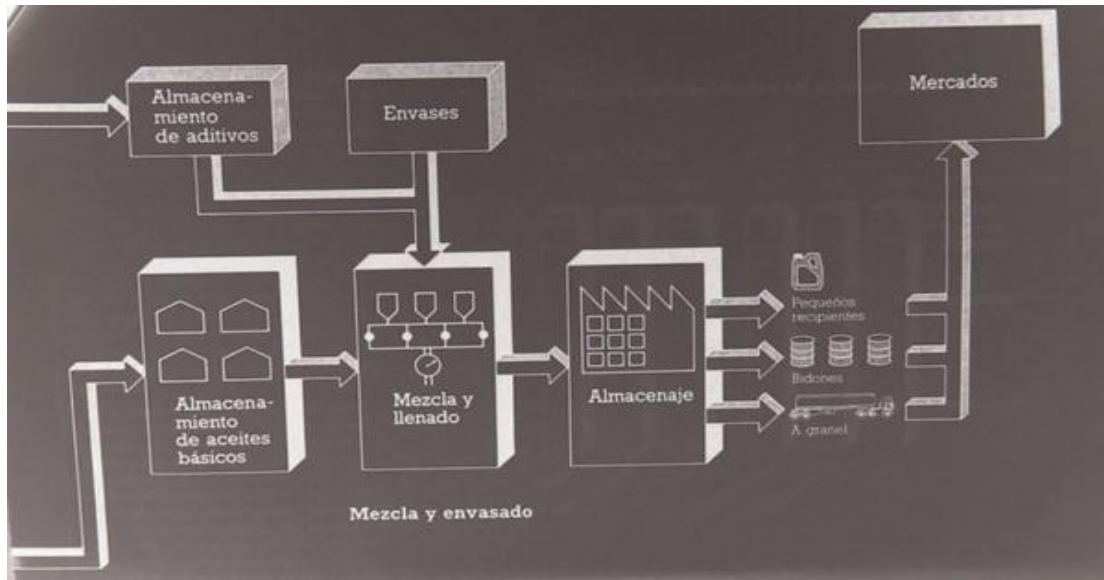


FIGURA 1.3 PROCESO DE PRODUCCIÓN DE ACEITES LUBRICANTES

1.2.1 Pruebas físicas y químicas

Muchas pruebas se han desarrollado para medir la calidad de un aceite lubricante, las cuales indica como se comportará éste al usarse. Muchas de ellas son pruebas físicas, incluyendo las de apariencia, olor, color, gravedad específica, incendio, punto de fluidez, viscosidad, residuo de carbono y cenizas. También se hacen ciertas pruebas químicas, tales como número de neutralización y número de saponificación. Las características de comportamiento de un aceite se determinan posteriormente por pruebas que miden la estabilidad de oxidación, resistencia a la corrosión, detergencia y dispersión. Otras pruebas miden la estabilidad de la espuma, presión extrema, reacción con el agua, homogeneidad, y compatibilidad.

1.2.2 Homogeneidad y Compatibilidad

Para determinar la homogeneidad y si el aditivo es estable, los aceites se calientan desde debajo de su punto de fluidez hasta que alcanzan una temperatura de 126 °C. No debe de existir separación del aditivo, usualmente indicada por un enturbiamiento del aceite.

Existen varias pruebas de laboratorio para medir la compatibilidad de los aceites. En una prueba simple en que intervienen dos aceites con aditivos, se mezclan éstos en volúmenes iguales y se agitan. Cualquier enturbiamiento de la mezcla es evidencia de separación del aditivo o incompatibilidad. Los lubricantes imparten o transfieren potencia de una parte de la maquinaria a otra. Los lubricantes contribuyen al enfriamiento de la maquinaria ya que acarrear calor de las zonas de alta fricción hacia otros lados (radiadores, etc.)Enfriándola antes de la próxima pasada.

1.2.3 Fundamentos de agitación y mezcla

La agitación se refiere al movimiento inducido de un material en una forma específica, generalmente con un modelo circulatorio dentro de algún tipo de contenedor. La mezcla, en cambio es una distribución al azar de dos o más fases inicialmente separadas. La operación de mezcla es mucho más difícil de estudiar y describir que la agitación.

Los tipos de flujo de la velocidad de un líquido en un tanque agitado, aunque complejos, son bastante definidos y reproducibles, el consumo de potencia se mide fácilmente. Los resultados de los estudios de mezcla sin embargo son difíciles de reproducir y dependen en gran medida de como se defina la "mezcla".

Con frecuencia el criterio de mezcla es visual, como ocurre en la utilización de fenómenos de interferencia para seguir la mezcla de gases en una conducción o en el cambio de color de un indicador ácido-base, para la determinación del grado de mezcla de líquidos. Otros criterios que han sido utilizados son, la variación de composición de pequeñas muestras tomadas al azar, en distintos puntos de la mezcla, la velocidad de transferencia de una fase a otra, y la uniformidad que se observa visualmente en la suspensión.

Se considera que los tanques cilíndricos verticales, cerrados y de montaje fijo, con diámetro igual a su altura tienen una geometría de proporción ideal para agitadores de entrada superior, si se desea una mayor profundidad del liquido se pueden instalar dos o más rodetes sobre el mismo eje, actuando cada rodete como un mezclador separado.

Estos tipos de agitadores dependen del tipo de proceso. En algunos procesos de agitación y mezcla y que se diseñan para aplicaciones de baja viscosidad, y para volúmenes específicos, se usan tanques con agitadores que constan de reductores y sistemas de 6 hélices, con velocidades de rendimiento que no exceden los 450 rpm. Además la velocidad crítica debe ser por lo menos el 130% de la velocidad de operación, para cada propeller. Y cada agitador esta ubicado a un pie del fondo del tanque. Generalmente para mejores resultados estos se diseñan con fondo de cono invertido.

Los más usados son los del tipo mezcladores, porque permiten una mejor homogenización para esta industria en particular.

1.3 Tipo de lubricación

Hay tres tipos básicos de lubricación: **limítrofe, hidrodinámica y mezclada**. Para saber que tipo de lubricación ocurre en cada caso, se necesita saber la presión entre los componentes a ser lubricados, la velocidad relativa entre los componentes, la viscosidad del lubricante y otros factores.

La lubricación limítrofe ocurre a baja velocidad relativa entre los componentes y cuando no hay una capa completa de lubricante cubriendo las piezas. Durante la lubricación limítrofe, hay contacto físico entre las superficies y hay desgaste. La cantidad de desgaste y fricción entre las superficies depende de un número de variables: la calidad de las superficies en contacto, la distancia entre las superficies, la viscosidad del lubricante, la cantidad de lubricante presente, la presión, el esfuerzo impartido a las superficies y la velocidad de movimiento.

En algún momento de velocidad crítica la lubricación limítrofe desaparece y da lugar a la lubricación hidrodinámica. Esto sucede cuando las superficies están completamente cubiertas con una película de lubricante.

La propiedad que más afecta la lubricación hidrodinámica es la viscosidad, ya que, debe ser lo suficientemente alta para brindar lubricación (limítrofe) durante el arranque del motor con el mínimo de desgaste, pero la viscosidad debe ser lo suficientemente baja para reducir al mínimo la fricción

viscosa del aceite a medida que es bombeada entre los metales (cojinetes). La menor cantidad de fricción innecesaria va a ocurrir con el lubricante de menor viscosidad posible para cada función específica.

Por tanto, se debe conocer la importancia del funcionamiento de los diferentes aceites, y su aplicación en la industria de la lubricación. Tomando como punto de partida la viscosidad, la cual es la que determina los diferentes cambios que sufre el aceite cuando es expuesto a condiciones heterogéneas en diferentes maquinarias o motores. De tal manera se explicara la diferencia entre los aceites multigrados y su desarrollo en los cambios de temperatura.

1.3.1 Funcionamiento de los aceites multigrado

Un aceite multigrado es un lubricante diseñado para trabajar en aplicaciones donde los cambios de temperatura son considerables, o donde las especificaciones de motor requieren una protección específica.

Es decir, un aceite multigrado es aquel que posee dos términos de viscosidad en su nomenclatura, el primero actúa en bajas temperaturas y es útil para el arranque del motor, el segundo término es el grado de viscosidad real del aceite en las temperaturas de operación del motor y es determinado por la viscosidad cinemática del aceite a 100 °C.

Por ejemplo en algunas regiones del hemisferio norte las temperaturas son de -40 °C en el invierno y de 40 °C en el verano. Si embargo, esto no significa que no puedan ser utilizadas en lugares en donde los cambios de temperatura no son tan dramáticos. En la actualidad, los aceites monogrados son cada vez menos comunes y han sido desplazados por los multigrados paulatinamente en todo el mundo. Los aceites monogrados se utilizan aún en aplicaciones como motores de competencia, equipo industrial que opera 100% en aplicaciones de alta temperatura y condiciones especiales de diseño de motores que no permiten el uso de un multigrado.

Para el caso de un aceite 15W40, mucha gente asume que el 15W es el grado del aceite para bajas temperaturas y el 40 el grado para altas temperaturas, aunque hay cierta lógica en ello, también hay grandes diferencias.

Si esto fuera cierto, un aceite 15W40 sería grado 15 en baja temperatura y 40 en alta temperatura. Eso significa que este aceite "engrosaría" con el cambio de la temperatura, lo cuál no es cierto. La realidad es que el aceite 15W40 es más grueso en bajas temperaturas que en altas temperaturas.

El número 15W realmente se refiere a la facilidad con la que el aceite puede ser "bombeado" en bajas temperaturas, mientras más bajo sea el número "W", mejores serán sus propiedades de baja viscosidad y podrá ser arrancado el motor a muy bajas temperaturas. La "W" significa Winter – invierno. Un aceite 5W40 es mejor que un 15W40 en arranque a bajas temperaturas.

La Sociedad de Ingenieros Automotrices le ha designado como SAE, por sus siglas en ingles, a la clasificación de viscosidad para aceites de tipo automotriz.

Una vez que el motor arrancó y se ha calentado, el aceite trabaja como un grado SAE 40, esto es la viscosidad con la que se protege al motor la mayor parte del tiempo. La gran ventaja de los aceites multigrados es su gran flexibilidad para proteger al motor en el arranque, con una viscosidad baja y que permite que el aceite llegue muy rápido a las partes del motor, para protegerlo contra el desgaste y posteriormente que sostenga una viscosidad correcta para el tiempo que opera en condiciones "normales" de temperatura que son reguladas por el sistema de refrigeración (enfriamiento) del motor.

Para lograr este efecto, es necesario adicionar al aceite un aditivo llamado mejorador del índice de viscosidad (IV) en la formulación del aceite. Se parte de un básico delgado con un paquete de aditivos de acuerdo a la función que va a desempeñar (ya sea para motor a diesel o gasolina), depresores de punto de congelación y se adiciona este polímero de alto peso molecular (una cadena muy larga) llamado mejorador del índice de viscosidad. Este polímero se expande conforme la temperatura incrementa, compensando en algo el efecto de adelgazamiento ocasionado por el incremento de la temperatura del aceite. Esto permite que el aceite base original se adelgace (baje su viscosidad) como un SAE 40, conservando una mejor viscosidad.

El aditivo mejorador de IV reduce la acción de adelgazamiento para lograr que el lubricante cumpla con estas condiciones. Lo que se pretende en realidad es que el aceite sea tan delgado como sea posible en bajas temperaturas y que no se adelgace tanto en altas temperaturas para que pueda proteger al motor. El beneficio es pues muy importante tanto en el arranque (a cualquier temperatura), ya que el aceite fluirá rápidamente al motor y lo protegerá adecuadamente en altas temperaturas (las de operación). Por supuesto que mientras más baja sea la temperatura de arranque, mayor será el beneficio. Esta es una de las razones por las que los aceites multigrados, también ahorran combustible.

En el proceso de oxidación, ocurren cinco cambios graves en el aceite que dan como resultado lo siguiente:

- i. El color se pone oscuro - Hay cambios en el color transparente o translucido a un grado de decoloración o completa opacidad
- ii. El olor se vuelve desagradable y acético debido a la presencia de excesivos ácidos orgánicos del petróleo y productos de oxidación similares
- iii. Incremento en la acidez - Pueden ocurrir cambios en el número de neutralización de 0.06 a 0.12 mg de KOH/g hasta por arriba de 2
- iv. Incremento de la acidez - La viscosidad de un aceite puede llegar al doble o triple debido a la oxidación. El espesamiento por oxidación es capaz de producir fluidos que tienen la consistencia de melaza - como lodo - bajo condiciones de extremadamente alta temperatura.
- v. Precipitación de insolubles - (lodos) - después de un periodo de inducción, el deterioro de un aceite puede acelerarse gradualmente hasta la formación de ácidos orgánicos o lodos que destruyen completamente el aceite.

Los aceites monogrados en la actualidad, no son recomendados por ningún fabricante de vehículos, dado lo limitado de su funcionamiento a diferentes temperaturas y que por otra parte, la diferencia de precios de adquisición entre los aceites multigrados y monogrados no son muy grandes, máxime si consideramos lo que actualmente cuesta un motor o su reparación.

Generalmente los aceites monogrados son utilizados por situaciones especiales, como por ejemplo, si un motor tiene problemas de compresión (gasta mucho aceite), y cuenta con un automóvil con un motor muy gastado, radicando y manejándolo en una zona de muy alta temperatura.

Pero para entender mejor estos conceptos se deben analizar cada una de las clasificaciones de viscosidad, es por eso que en la sección siguiente se explicaran las clasificaciones mas usadas para los aceites lubricantes.

1.3.2 Clasificación ISO y SAE para lubricantes.

Hay cuatro sistemas comunes de clasificación de la viscosidad de los aceites lubricantes. Con frecuencia es deseable comparar un grado en un sistema con otro, pero en ocasiones esto no es posible, dado que los estándares no están basados en viscosidades a la misma temperatura. Este es el caso de los sistemas de viscosidad SAE para aceites de motor y SAE para engranes automotrices (Viscosidades a 100 °C) comparados con los sistemas ISO, VG y AGMA para lubricantes de engranes Industriales (Viscosidades a 40 °C).

En 1975, La Organización Internacional de estándares (ISO), en conjunto con la Asociación Americana de Pruebas y Materiales (ASTM), La Sociedad de Tribólogos e Ingenieros en Lubricación (STLE), El Instituto Británico de estándares (BSI) y El instituto Alemán de Normalización (DIN), establecieron un enfoque para minimizar la confusión. Ahora se le conoce como el Grado de Viscosidad de la Organización Internacional de estándares, - Grado ISO VG.

El propósito del sistema ISO VG de clasificar la viscosidad en grados es establecer un método de medición para que los fabricantes de lubricantes, diseñadores de equipos y maquinaria y usuarios, tengan una base común para designar o seleccionar lubricantes industriales. Los grados de clasificación AGMA para lubricantes de engranes industriales, coinciden exactamente con los grados de viscosidad ISO VG, pero además consideran especificaciones de capacidad de carga y tipos de aditivos contenidos en estos lubricantes, (AGMA R&O, AGMA Comp., AGMA EP y AGMA S).

Un aceite del tipo (S.A.E. 0W, 5W, 10W, 15W, 20W) trabaja mejor a bajas temperaturas por lo que la sigla W significa Winter (invierno), sin embargo, un aceite grueso trabaja mejor a altas temperaturas, como los aceites SAE 40 ó 50. Por tanto, la mayoría de los fabricantes elaboran aceites multigrados, esto es que trabajen correctamente a bajas y altas temperaturas, como por ejemplo los aceites SAE 0W-30, SAE 5W-30, SAE 10W-40, 15W-40, 20W-50.

El símbolo inferior es el símbolo normal del A.P.I., (DONA) el cual indica la calidad del aceite a utilizar así como su viscosidad. El símbolo superior (starburst), muestra que este aceite esta certificado por A.P.I., sin embargo únicamente lo ostentan los aceites multigrados de baja viscosidad como los SAE 0W, 5W y 10W. El Instituto Americano del Petróleo, clasifica los aceites para Motores a Gasolina, utilizando las letras del alfabeto, antecediendo su clasificación con la letra "S" (Service Station). Antecediendo su clasificación con la letra "C" para motores Diesel.

1.3.3 Lubricación en la capa límite

El hombre necesita controlar el desgaste y la fricción ya sea que pertenezca a una civilización primitiva o altamente tecnológica.

Por lo general, se debe mantener bajo el desgaste. Es por ello que deseamos evitar un excesivo desgaste de nuestra piel, ropas, herramientas, equipo, etc.

La lubricación en la capa límite proporciona generalmente el control necesario de la fricción y el desgaste. En general, se reconoce como lubricación en la capa límite a la fricción y el desgaste que parecen depender de propiedades del lubricante que no incluyen la viscosidad.

La lubricación en capa límite es considerada efectiva cuando los coeficientes de fricción son menores de 0.1. Bajo las llamadas condiciones no lubricadas o secas de deslizamiento sin desgaste catastrófico, los coeficientes de fricción van generalmente de 0.2 a 0.7. El rápido aumento en desgaste con el trabajo transmitido corresponde a un coeficiente de desgaste unas cien veces mayor que el de una carga baja. Los bajos coeficientes de desgaste son

alcanzados mediante lubricación excesiva, esto depende de las características físicas y químicas del lubricante más bien que de la viscosidad. El termino "propiedades de lubricación en capa límite" se aplica al efecto de estas características sobre los coeficientes de desgaste y fricción.

Resulta esencial para la comprensión de la lubricación en la capa límite el reconocimiento de que las superficies tienen asperezas o irregularidades que son grandes en comparación con las dimensiones moleculares.

La fricción en la capa límite es la fuerza requerida para deslizar una superficie de contacto sobre otra. La fricción consiste de dos componentes de adhesión o deslizamiento y un componente de deformación o de ranuración. La fricción en la capa límite depende de la resistencia al deslizamiento de la película de la capa límite, entre las asperezas, y de las pérdidas de la deformación por arado, en las capas de la superficie.

Cuando las superficies se deslizan bajo condiciones de lubricación de la capa límite, el desgaste parece ser producido por cuatro mecanismos principales que actúan solos y en combinación. Estos cuatro mecanismos son la corrosión, la fatiga, el arado o rasurado y la adhesión.

El desgaste corrosivo se presenta cuando el material de la superficie del cojinete reacciona químicamente con su medio ambiente para formar una película de capa límite que contiene parte del material del cojinete. El desgaste corrosivo ocurre también si la película se resbala de la superficie cuando es comprimida bajo condiciones como las que existen en las zonas de soporte de carga.

La fatiga es el procedimiento de fracturación de las asperezas, se presenta como resultado de altas tensiones muy repetidas. Cada ciclo de tensión o presión produce alguna deformación plástica hasta que al fin parte o todas las asperezas se fracturan o desaparecen de la superficie. Este mecanismo de desgaste resulta evidente debido a la aparición de micropicaduras en los cojinetes de los elementos laminadores.

La adhesión es el mecanismo de desgaste que se encuentra mencionado con más frecuencia como el procedimiento primario o primer causante en los trabajos de referencia.

El problema desde el punto de vista de la lubricación de capa límite es proporcionar una película de capa límite con las características físicas adecuadas para controlar el desgaste y la fricción.

Por tanto es deseable que un lubricante separe las superficies de soporte o rodamiento ya que la cantidad de deformación plástica requerida para producir superficies limpias aumentara con la separación. La separación es lograda mediante dos propiedades de las películas de la capa límite. Estas propiedades son la adherencia y coherencia. La adherencia se refiere a la habilidad de la película de capa límite para ser llevada dentro de las zonas de contacto real microscópicas de soporte de carga en la punta de las asperezas, y para quedarse unida a las superficies mientras pasa por las zonas. Esta es una propiedad análoga a la viscosidad en el caso de un líquido newtoniano.

El segundo mecanismo para reducir el esfuerzo de deslizamiento sobre las asperezas abarca las propiedades de conductividad térmica de la película de capa límite. Incluso un deslizamiento muy lento tiende a calentar la película debido a que las resistencias friccionales son elevadas y la disipación de la energía se concentra en un volumen extremadamente pequeño de película. El calentamiento reduce la resistencia al deslizamiento de la película y, por tanto, la fricción.

1.4 Parámetros de calidad para aceites lubricantes (características)

1.4.1 Viscosidad

La viscosidad es la principal característica de la mayoría de los productos lubricantes. Es la medida de la fluidez a determinadas temperaturas. La viscosidad es una medida de la fricción interna del fluido, esto es, la resistencia a la deformación. Si la viscosidad es demasiado baja el film lubricante no soporta las cargas entre las piezas y desaparece del medio sin cumplir su objetivo de evitar el contacto metal-metal. Si la viscosidad es demasiado alta el lubricante no es capaz de llegar a todos los intersticios en donde es requerido. Al ser alta la viscosidad es necesaria mayor fuerza para mover el lubricante originando de esta manera mayor desgaste en la bomba de aceite,

además de no llegar a lubricar rápidamente en el arranque en frío. La medida de la viscosidad se expresa comúnmente con dos sistemas de unidades SAYBOLT (SUS) o en el sistema métrico CENTISTOKES (CST).

La viscosidad de un fluido newtoniano está determinada por el estado del material. De tal modo $\mu = \mu(T, p)$. La temperatura es la variable más importante. Se dispone de excelentes ecuaciones empíricas para la viscosidad como una función de la temperatura (STREETER, 1989).

No es posible estimar teóricamente las viscosidades para líquidos con exactitud. El fenómeno de la transferencia de momento por medio de colisiones moleculares parece oscurecerse en líquidos por efecto de los campos de fuerza que interactúan entre las moléculas líquidas apiñadas y muy cercanas unas a otras.

Las viscosidades de líquidos son afectadas drásticamente por la temperatura. Esta dependencia de la temperatura absoluta se representa bien mediante la ecuación empírica:

$$\mu = A \cdot \exp(B/T) \quad \text{Ecc. 1.1}$$

Donde:

μ = Viscosidad del líquido

A y B = constantes

T = Temperatura del líquido

En los líquidos un aumento de la temperatura disminuye la viscosidad. Las viscosidades de la mayoría de los líquidos no son afectadas por presiones moderadas pero se han encontrado grandes incrementos a presiones sumamente elevadas. Por ejemplo la viscosidad del agua a 10,000 atm es el doble que a 1 atm. Compuestos de mayor complejidad muestran un aumento en la viscosidad de varios órdenes de magnitud sobre el mismo intervalo de temperatura.

La propiedad de un fluido que tiende a oponerse a su flujo cuando se le aplica una fuerza, es decir, la propiedad mediante la cual se ofrece resistencia al corte. Los fluidos de alta viscosidad presentan una cierta resistencia a fluir; los fluidos de baja viscosidad fluyen con facilidad.

La resistencia que un fluido ofrece al corte depende de las fuerzas de cohesión y la rapidez de la transferencia de cantidad de movimiento entre moléculas. La cohesión parece ser la causa predominante de la viscosidad en un líquido, y como la cohesión disminuye al incrementar la temperatura, lo mismo le sucede a la viscosidad. Un gas tiene fuerzas de cohesión muy pequeñas y la mayor parte de su resistencia al esfuerzo cortante resulta de la transferencia de cantidad de movimiento molecular (ROPER J.A., 1993).

La viscosidad de un fluido disminuye con la reducción de densidad que tiene lugar al aumentar la temperatura. En un fluido menos denso hay menos moléculas por unidad de volumen que puedan transferir impulso desde la capa en movimiento hasta la capa estacionaria. Esto, a su vez, afecta a la velocidad de las distintas capas. El momento se transfiere con más dificultad entre las capas, y la viscosidad disminuye. En algunos líquidos, el aumento de la velocidad molecular compensa la reducción de la densidad. Los aceites de silicona, por ejemplo, cambian muy poco su tendencia a fluir cuando cambia la temperatura, por lo que son muy útiles como lubricantes cuando una máquina está sometida a grandes cambios de temperatura.

La medida de la viscosidad es la medida de resistencia al movimiento (deformación) de varias capas ideales paralelas de un fluido moviéndose laminarmente a un gradiente de velocidad Δ , uniforme de separación de esas capas, cuando se produce la acción de una tensión deformante (τ), durante el movimiento, las capas se mantienen sin turbulencias

En el fluido **Newtoniano** solamente ocurren efectos de atracción mecánica y el nivel energético de esas interacciones se aproxime al nivel energético para ruptura y formación de puentes de hidrógeno en un líquido. En estos fluidos la gradiente Δ , de deformación es directamente proporcional a la fuerza (Tensión) aplicada τ , siendo la proporcionalidad dada intrínsecamente dependiente de la naturaleza del fluido.

Esa constante es el coeficiente de viscosidad (η), que representa el atributo mecánico entre las capas $\tau = \eta \Delta$, como el atributo, por definición es independiente de la variación de τ y de la gradiente Δ .

Cuando estas interacciones entre los componentes y éstas dependen de la velocidad de deformación causada por fuerzas externas, este fluido es llamado **No Newtoniano**. A esta categoría pertenecen la gran mayoría de los coloide hidrofilitos.

Para estos sistemas, el efecto de las temperaturas sobre la viscosidad varía con la naturaleza más o menos hidrofilitas de las dispersiones. El coeficiente de viscosidad (H) es llamado viscosidad aparente.

En los fluidos newtonianos un valor de η caracteriza el fluido, en cuanto para el No Newtoniano el valor de η varía con la fuerza aplicada produciendo diferentes tipos de comportamiento en función de τ .

Cuando la fuerza aplicada aumenta la fluidez del sistema o cesa, baja su viscosidad independientemente del tiempo de aparición de la fuerza, tenemos un tipo de fluido que es llamado **Pseudoplástico** y, al cesar la causa deformante, el fluido vuelve a tener el valor de la viscosidad aparente inicial (η_{ap})

En caso opuesto, cuando la fuerza disminuye (viscosidad aparente aumenta) por efecto de una fuerza uniforme aplicada al fluido. En este caso, el fluido al ser sometido a la agitación aumenta su resistencia al movimiento volviendo a η_{ap} inicial al cesar la fuerza aplicada independiente del tiempo de aplicación de la fuerza, es llamado **Dilatante**.

Los problemas de flujos de fluidos reales son mucho más complejos que el los fluidos ideales, debido a los fenómenos causados por la existencia de la viscosidad.

La viscosidad introduce resistencias al movimiento, al causar, entre las partículas del fluido y entre éstas y las paredes limítrofes, fuerzas de corte o de fricción que se oponen al movimiento; para que el flujo tenga lugar, debe realizarse trabajo contra estas fuerzas resistentes, y durante el proceso parte de la energía se convierte en calor.

La inclusión de la viscosidad permite también la posibilidad de dos regímenes de flujo permanente diferente y con frecuencia situaciones de flujo completamente diferentes a los que se producen en un fluido ideal. También

los efectos de viscosidad sobre el perfil de velocidades, invalidan la suposición de la distribución uniforme de velocidades.

1.4.2 Viscosidad cinemática

Es una medida de la resistencia a fluir de un fluido bajo la acción de la gravedad. La presión hidrostática que actúa es proporcional a la densidad del fluido, ρ . Para cada viscosímetro en particular, el tiempo de flujo de un volumen dado del fluido, es proporcional a su viscosidad cinemática, $\nu = \eta/\rho$, donde η es el coeficiente de viscosidad dinámica.

a. La viscosidad en los diferentes materiales

La viscosidad puede definirse como la resistencia interna a fluir de una sustancia cuando se le aplica un esfuerzo de cizalla. Hay sustancias que a bajos esfuerzos no fluyen, se comportan como sólidos. Cuando se excede un mínimo del esfuerzo, este empieza a fluir y en niveles de mayor esfuerzo se comportan como fluidos newtonianos (como el agua). El stress inicial que se requiere para hacer que un fluido empiece a fluir es el punto de fluencia viscosa. Los fluidos que tienen este punto de fluencia viscosa se denominan sustancias Bingham. Hay otros fluidos que no poseen un punto de fluencia viscosa definido y muestran una relación no lineal entre el esfuerzo de cizalla y el grado de deformación interna. Se denomina pseudoplásticos.

b. Factores que afectan a la viscosidad

Que un fluido fluya de un modo turbulento o laminar, con todo lo que conlleva, depende de su grado de fluidez y de la viscosidad. El trabajo de Reynolds nos dio un parámetro adimensional muy útil, el número de Reynolds (Re) que relaciona la velocidad de fluido (U), la profundidad (h) y la viscosidad cinemática (ν) de un fluido en movimiento:

$$Re = \frac{Uh}{\nu}$$

Ecc. 1.2

Donde:

Re: número de Reynolds
U: velocidad del fluido
h: profundidad
 η : viscosidad cinemática

La naturaleza de cualquier flujo dado de un fluido real se puede estimar, a partir del número de Reynolds. Un número pequeño de Reynolds indica que las fuerzas viscosas predominan, mientras que un valor grande del número de Reynolds indica que predominan las fuerzas de inercia. La transición de un flujo laminar a uno turbulento tiene lugar cuando el número de Reynolds es mayor a 1000-2000 (RAYMON, 1978).

Muchos materiales naturales, tienen un punto de fluencia viscosa tan alto que cuando fluyen, el cizallamiento se da sólo en los bordes. Su centro permanece casi indeformado y el material es empujado en masa.

- i. **Índice de viscosidad:** Los cambios de temperatura afectan a la viscosidad del lubricante generando así mismo cambios en ésta, lo que implica que a altas temperaturas la viscosidad decrece y a bajas temperaturas aumenta. Arbitrariamente se tomaron diferentes tipos de aceite y se midió su viscosidad a 40°C y 100°C, al aceite que sufrió menos cambios en la misma se le asignó el valor 100 de índice de viscosidad y al que varió en mayor proporción se le asignó valor 0 (cero) de índice de viscosidad. Luego con el avance en el diseño de los aditivos mejoradores del índice de viscosidad se logró formular lubricantes con índices mayores a 100.
- ii. **Flash point:** El punto de flash es el punto en que 250cc de aceite producen un flash (o fogonazo) en presencia de una llama abierta, esto puede ocurrir en cualquier momento entre los 132°C hasta 327°C. De esta manera se demuestra la volatilidad del aceite y es un importante factor para determinar el grado de consumo del mismo en un motor.
- iii. **Punto de escurrimiento (pour point):** Es la temperatura más baja a la cual el aceite deja de fluir, esto está relacionado directamente al tipo de base que se utiliza para la elaboración del lubricante.

2.0 LA INDUSTRIA DE LUBRICANTES A NIVEL MUNDIAL

Sin lubricantes, la maquinaria del mundo se quedaría parada. Siempre que haya superficies de metal que se tocan cuando están en movimiento, ya sea en un motor o en una maquina industrial, se necesita un lubricante que las mantenga separadas, las refrigere, prevenga la corrosión y absorba y arrastre las substancias químicas y los depósitos potencialmente dañinos que se forman en la maquinaria en funcionamiento. Para que el lubricante pueda hacer bien todo esto, debe tener ciertas propiedades y ser adecuado para la aplicación en la que se use, su selección es importante.

La producción de lubricantes es una parte integral de la industria petrolífera, ya que los aceites básicos derivan del proceso de refinación del petróleo crudo. La inversión necesaria es alta, los costos de capital para producir una tonelada de lubricantes pueden ser varias veces mayores que los de obtener una tonelada de gasolina. Las modernas plantas de mezcla y distribución son avanzadas y complejas y, en algunos casos, totalmente automáticas.

2.1 Antecedentes históricos

El consumo mundial de lubricantes se situaba en unos 40 millones de toneladas en 1986. De estas alrededor de 24 millones corresponden Al mundo no comunistas (WOCA). En términos de negocio petrolífero. En su totalidad, el consumo de lubricantes solo constituye el uno por ciento, aproximadamente, de toda la demandad petróleo, representando el tres por ciento (20.000 millones de dólares) de las ventas de petróleo (SHELL BRIEFING SERVICE, 2001).

Durante los años de 1960, en el WOCA la demanda de lubricantes aumento a razón de cinco por ciento por año, en promedio, mas entre las dos crisis del petróleo, de 1973 y 1979, la tasa de crecimiento medio se redujo a la mitad. Desde 1979, el consumo ha fluctuado entre 38 y 40 millones de toneladas anuales. La principal razón de este cambio fue el alza de los precios del petróleo en los años de 1970, que no solo hizo subir el costo de los lubricantes mismos, sino que también afecto los mercados en los que se usan.

Durante la última parte de la década de 1970 y principios de la década de 1980, el sector automotor se caracterizó por la tendencia a los automóviles más pequeños, de mayor eficiencia y mejor performance, periodos cada vez más largos entre cambios de aceite y más estricta legislación para controlar las emisiones del escape de los motores. Como resultado de esto, los aceites de motor han tenido que trabajar más duro para satisfacer las exigencias de los fabricantes de vehículos y la de los clientes. Por ello ha sido necesario hacer importantes inversiones en investigación y desarrollo en este sector del mercado petrolero, altamente especializado y de volumen relativamente bajo. En consecuencia, se ha tendido a diseñar lubricantes de manera más específica para cada aplicación. La demanda de lubricantes depende de diversos factores, incluyendo la población, la actividad económica, el grado de industrialización, la cantidad de automóviles particulares y la eficiencia del uso.

Antes de 1950, Estados Unidos suministraba una alta proporción de los lubricantes que necesitaba el WOCA. Esta situación se modificó en los 25 años siguientes al ponerse en marcha una nueva capacidad, especialmente en las economías industriales de otros países de la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OCDE), para satisfacer la mayor demanda. Desde mediados de la década de 1970, las principales áreas de crecimiento de la producción de lubricantes están fuera de la OCDE (SHELL BRIEFING SERVICE, 2001).

En 1986, unos dos tercios de la demanda total del WOCA correspondían a los países de la OCDE, en comparación con los tres cuartos de diez años atrás. Esto refleja una tasa media de crecimiento del 3.5 por ciento por año en la demanda de los países no miembros de la OCDE durante este periodo. En 1985, Estados Unidos absorbió unos 8 millones de toneladas, o sea casi la mitad del total del consumo de la OCDE.

Se estima que el WOCA dispone de 26 millones de toneladas de capacidad de producción de aceites básicos y tres cuartos de estas están situadas en países de la OCDE, principalmente en Estados Unidos y Europa Occidental, es decir que ya existe suficiente capacidad para satisfacer la demanda mundial de lubricantes.

En 1985, el comercio mundial neto de lubricantes llegó a 1.6 millones de toneladas, aproximadamente, Europa Occidental y Estados Unidos fueron los principales exportadores.

Los mercados de lubricantes pueden dividirse en cuatro sectores principales el del transporte, la industria, los aceites de proceso y las grasas, y éstos se subdividen en aplicaciones específicas. En términos de volumen, los aceites de motor son la categoría más importante y representa la mitad de la demanda de lubricantes, de 24 millones de toneladas. Los aceites para motores diesel constituyen casi un tercio y los aceites para motor de gasolina, un 20 por ciento de este total. Los aceites industriales forman otro tercio del mercado y los aceites de proceso y las grasas, juntos alrededor del 10 por ciento. La división de este mercado varía considerablemente de un país a otro.

2.2 Estadística de comercio exterior para importaciones y exportaciones en El Salvador (período 1998-2002)

Se presentan datos estadísticos de la producción y demanda de aceites lubricantes en El Salvador, desde 1998 hasta el año 2002.

CUADRO 2.1 EXPORTACIONES EN EL SALVADOR, PARA PREPARACIONES DE LUBRICANTES¹.

Descripción: Preparaciones Lubricantes		
Partida: 27100040		
Año	Valor (us\$) F.O.B	Volumen (KG)
2002	32,210.38	13,333.8
2001	92,558.63	34,562.5
2000	2,793,607.25	3,479,117.33

¹ CENTREX. ESTADISTICA DE COMERCIO EXTERIOR. EL SALVADOR

CUADRO 2.2 EXPORTACIONES EN EL SALVADOR, PARA ACEITES Y GRASAS LUBRICANTES².

Descripción: Las DEM S. Partida: 34031900		
Año	Valor (us\$) F.O.B	Volumen (KG)
2002	16,531.35	27,173.48
2001	61,005.38	63,321.74
2000	24,618.6	29,506.6
1999	380,513. 4,567	7,675
1998	17448	20,19

Estas representan las dos categorías en las que se incluye la elaboración y exportación de aceites lubricantes, según las estadísticas de Comercio Exterior, del Ministerio de Economía. Las preparaciones lubricantes se presentan en el cuadro 2.1 y son las bases y aditivos para lubricantes que se producen en el país, el volumen de producción ha disminuido, debido a que la mayoría de empresas, se dedican principalmente a la elaboración y exportación de aceites lubricantes como producto terminado y no sus derivados.

Actualmente son pocas las industrias que elaboran lubricantes y grasas. En nuestro país, las grasas son comercializadas y no son elaboradas por cada productor, así como se observa en el cuadro 2.3, las importaciones representan el mayor volumen del aceite lubricante con respecto a la producción del país. El mayor volumen de producción de lubricantes se dio en el año 2001, como se puede ver en el cuadro 2.2.

² CENTREX. ESTADISTICA DE COMERCIO EXTERIOR. EL SALVADOR

El cuadro 2.3, muestra la clasificación general de todas las grasas y preparaciones de lubricantes en todas sus aplicaciones, que son importados por El Salvador.

Las importaciones y exportaciones no reflejan el consumo y producción de los aceites lubricantes en el país, ya que solamente es un indicativo de diferentes clasificaciones de grasas y aceites que se comercializan en El Salvador, y que son de utilidad para conocer un aproximado del volumen importado y exportado.

CUADRO 2.3 IMPORTACIONES EN EL SALVADOR, PARA PREPARACIONES LUBRICANTES.

Descripción: Preparaciones Lubricantes (Incluidos los aceites de corte, preparaciones para tuercas, antiherrumbre y anticorrosión, desmoldeo a base de lubricantes)		
Partida: 3403		
Año	Valor (us\$) F.O.B	Volumen (KG)
2002	702,779.47	328,297.89
2001	380,513.91	324,102.09
2000	61,400.23	41,553.85
1999	1,912.28	821
1998	942,581.86	533,058.08

3.0 CARACTERISTICAS REOLOGICAS DE FLUIDOS NO NEWTONIANOS

"NADA ES, TODO FLUYE", afirmó el filósofo griego Heráclito en el siglo V antes de nuestra era... y tenía razón. Si pudiéramos observar las rocas sólidas en el interior de la Tierra, el concreto y el acero de las construcciones o el vidrio de los vitrales de una catedral antigua, durante intervalos de tiempo muy grandes, podríamos comprobar que efectivamente todo *puede* fluir (GALVEZ, 2001).

Entender de manera precisa qué significa y cómo se produce el fenómeno del flujo de la materia tiene gran importancia tanto desde el punto de vista científico fundamental como del práctico. Por ejemplo, el ingeniero en aeronáutica necesita saber cómo fluye el aire alrededor del ala de un avión o el aceite lubricante en el motor. Un ingeniero civil debe poder predecir cómo se moverá el suelo sobre el que se asientan los cimientos de una construcción debido al peso de la misma y un químico que sintetiza plásticos necesita saber si sus materiales tienen las características apropiadas para poder moldearlos y darles una forma determinada. Estos son sólo algunos ejemplos de los numerosos y diversos problemas prácticos en donde interviene el fenómeno del flujo de un material (GALVEZ, 2001).

Aunque todos tenemos una idea intuitiva de lo que significa que un material cualquiera fluya, para definir de manera más precisa lo que es el flujo señalaremos primero que este fenómeno está íntimamente relacionado con otro, el de la *deformación*. Se llama deformación al movimiento de una parte de un cuerpo con respecto a otras partes del mismo y que, como consecuencia, produce un cambio en su forma o tamaño.

En otras palabras, una deformación cambia la distancia que existe entre los diferentes puntos de un cuerpo, o más específicamente, resulta del desplazamiento de las partículas (moléculas, átomos o iones) de las que está compuesto el material, las cuales, bajo la acción de fuerzas externas, se desplazan ligeramente de sus posiciones originales (GALVEZ, 2001).

En general, los cuerpos se deforman cuando sobre ellos actúa un *esfuerzo*, el cual representa la fuerza por unidad de área que se produce en un material debido a la acción de una fuerza interna o externa que actúa sobre el sistema. El origen de estos esfuerzos puede ser muy diverso; por ejemplo, el calentamiento no uniforme de un material produce una distribución de esfuerzos dentro del mismo, o la deformación misma de un cuerpo genera otros esfuerzos. Sin embargo, aunque las causas que los produzcan sean variadas, los esfuerzos se pueden clasificar en dos grandes grupos: normales y de corte (cortantes). Si los esfuerzos resultan de aplicar fuerzas perpendiculares a la unidad de área del material se llaman normales, y dependiendo del sentido de esta fuerza respecto a la superficie, a su vez se clasifican en tensiles o de compresión (Figura 3.1).

Si en cualquier punto de un material los esfuerzos son normales y de compresión, como ocurre en el caso de un objeto en reposo y totalmente simplemente presión, la cual es un ejemplo de esfuerzo intuitivo y familiar para todos (BARNES, 1989).

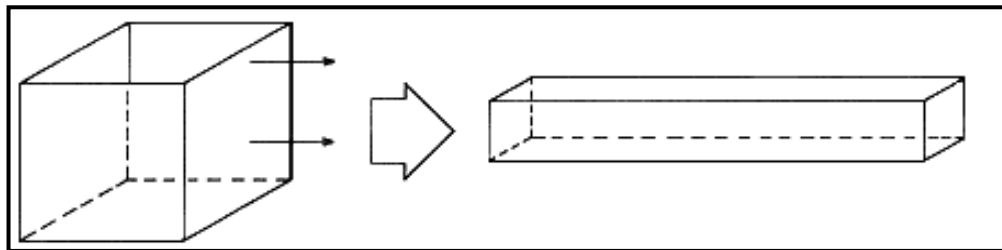


FIGURA 3.1: ELONGACIÓN PRODUCIDA EN UNA MUESTRA DE MATERIAL POR UN ESFUERZO TENSIL NORMAL.

Por otra parte, los esfuerzos de corte resultan de aplicar fuerzas paralelas y contenidas en el plano de la unidad de área de material. En una barra sólida estos esfuerzos se producen al torcer la barra alrededor de su eje longitudinal, como si se apretara un tornillo (Figura 3.2). En cambio, en un fluido los esfuerzos de corte se producen, por ejemplo, al deslizar una superficie sobre un líquido lubricante, o cuando líquidos y gases resbalan por

una superficie sólida o fluyen por un tubo, o cuando un objeto se mueve en el seno de un fluido, como ocurre durante el paso de un avión a través del aire (BARNES, 1989).

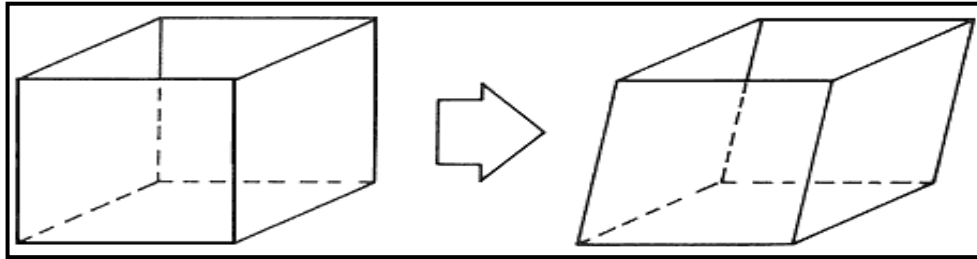


FIGURA 3.2: DEFORMACIÓN TÍPICA PRODUCIDA EN UN MATERIAL POR UN ESFUERZO DE CORTE.

Cuando los esfuerzos aplicados son pequeños, algunos materiales se deforman y recuperan su forma original al desaparecer los esfuerzos; a estos materiales se les llama sólidos elásticos. A diferencia de estos sistemas, los fluidos se caracterizan por ser muy susceptibles frente a la acción de los esfuerzos; de hecho, su manera de reaccionar en estas condiciones es lo que define en forma precisa a un fluido: un material incapaz de soportar la acción de un esfuerzo de corte. Es decir, por pequeño que sea el esfuerzo aplicado, el fluido experimenta una "deformación continua en el tiempo" o "flujo", y aunque desaparezca el esfuerzo, el fluido no recupera su forma original. Cuando este fenómeno ocurre, las capas de fluido se desplazan unas respecto a otras con velocidades diferentes.

Sin embargo, los sólidos elásticos también pueden fluir si el esfuerzo aplicado alcanza el valor necesario para que se produzca una deformación permanente. A este valor del esfuerzo se le llama *esfuerzo de cedencia* del sólido, y marca la transición entre su comportamiento elástico y el plástico, es decir cuando puede fluir (BARNES, 1989).

Se ha dicho que un líquido o gas tiende a fluir bajo la acción de un esfuerzo de corte por pequeño que sea, sin embargo, no todos los fluidos fluyen de la misma manera. No hay que olvidar que cualquier fluido real es

viscoso, es decir, ofrece una mayor o menor resistencia al deslizamiento relativo de sus capas, que se mueven a velocidad diferente, o sea, que se resiste a deformarse y fluir. En consecuencia, la viscosidad de un fluido necesariamente afecta a la relación que existe entre el esfuerzo aplicado y la deformación producida. Esta relación se expresa por las llamadas *relaciones constitutivas*, que describen el comportamiento mecánico de un material de manera aproximada y bajo circunstancias particulares. Así, por ejemplo, una misma barra metálica puede considerarse completamente rígida si el esfuerzo aplicado es muy pequeño comparado con el valor de su esfuerzo de cedencia; en cambio, se comportará como un sólido elástico ante valores mayores del esfuerzo aplicado, pero aún menores que el esfuerzo de cedencia. Pero si el esfuerzo es muy grande se comportará como un sólido plástico. En cada caso el comportamiento mecánico está descrito por una relación constitutiva diferente (PATTON, 1979).

Casi 320 años atrás, el Científico Inglés Robert Hooke, describió la relación existente entre esfuerzo y deformación en sólidos elásticos, mientras que su colega contemporáneo Sir Isaac Newton planteó entre otras la ley de la viscosidad de los fluidos. Aunque ya desde 1678, Hooke había establecido que para una gran variedad de materiales la deformación elástica producida es proporcional al esfuerzo aplicado, no fue sino hasta 1775 cuando el matemático suizo Leonhard Euler propuso la primera relación constitutiva para un fluido, el llamado fluido perfecto o ideal. Este es un fluido cuya fricción interna o viscosidad es estrictamente nula y que, además, tiene la siguiente propiedad: el esfuerzo que una parte del fluido ejerce sobre las partes adyacentes es normal; es decir, siempre es perpendicular a la superficie que separa ambas partes. Cualquier fluido real es viscoso en alguna medida y, sólo en forma aproximada, cuando su densidad es muy baja, se comporta como un fluido ideal. Por ejemplo, el helio a temperaturas muy bajas puede comportarse como el fluido ideal de Euler, con una viscosidad exactamente igual a cero (BARNES, 1989).

La primera relación constitutiva para un fluido viscoso la estableció Isaac Newton en 1687 al proponer que para estos fluidos el esfuerzo de corte

aplicado y la deformación producida es proporcional, es decir, a mayor esfuerzo mayor deformación. Como ya hemos visto, la deformación implica que la velocidad relativa de las capas de fluido no es la misma, por lo tanto la relación de Newton también puede expresarse diciendo que el esfuerzo de corte y el cambio de la velocidad en el fluido son proporcionales. A la constante de proporcionalidad se le define como la viscosidad del fluido; por esta razón a esta relación constitutiva lineal también se le llama ley de la viscosidad de Newton. A los fluidos cuyo comportamiento mecánico se describe adecuadamente en términos de esta relación constitutiva se les llama *fluidos newtonianos*. El agua y el aire, que son los fluidos más abundantes de la Tierra, se comportan como newtonianos con una excelente aproximación. Estos fluidos también son los más estudiados y los mejor comprendidos; a las ecuaciones que gobiernan su movimiento (flujo) se les conoce como las ecuaciones de Navier-Stokes y fueron formuladas desde mediados del siglo pasado por el ingeniero francés Louis Marie Navier y por el físico inglés George Gabriel Stokes. La descripción del flujo basada en estas ecuaciones resultó muy exitosa, pues ha permitido entender muchos fenómenos y conduce a predicciones que se comparan muy bien con el experimento. Sin embargo, aún persisten problemas teóricos y prácticos que no han podido resolverse. Es conveniente subrayar que, según la relación de Newton, no sólo las magnitudes de la "causa" (esfuerzo aplicado) y el "efecto" (deformación o flujo) son proporcionales, sino que la relación entre ellas también es "instantánea". Esto significa que al flujo en el instante de observación sólo contribuye el esfuerzo aplicado en el mismo instante de tiempo. Los esfuerzos que hayan existido en el fluido en tiempos anteriores no contribuyen a producir la deformación en el momento de la observación. En otras palabras, los fluidos newtonianos no guardan "memoria" de las deformaciones previas (PATTON, 1979).

La experiencia ha demostrado que la gran variedad de líquidos y gases newtonianos tienen una característica común, a saber, las moléculas que los componen son ligeras, es decir, de bajo peso molecular. Como su nombre lo indica, el peso molecular es una medida del peso de una molécula con respecto

a un patrón de referencia, el cual para todo propósito práctico se escoge como el peso de un átomo de hidrógeno, y que puede tomarse como la unidad. Todos conocemos el efecto del sifón, lo practicamos al beber un líquido ordinario con un popote: el líquido fluye a través de él en tanto que uno de sus extremos esté dentro del líquido. Para nuestra sorpresa, si en vez de agua tenemos un fluido no newtoniano se observa que el efecto de sifón puede ocurrir aunque el tubo de succión no esté inmerso en él. De modo que este fluido puede succionarse aun y cuando existan varios centímetros de separación entre la superficie del fluido y el extremo del tubo. A este efecto se le conoce como *sifón sin tubo* (Figura 3.3).

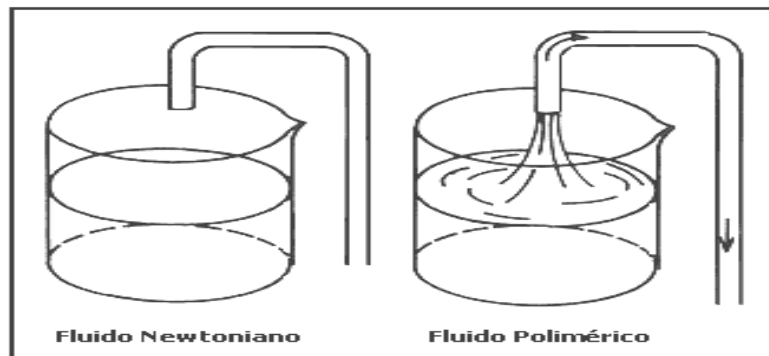


FIGURA 3.3: EFECTO DE SIFÓN SIN TUBO PARA UN FLUIDO NN.

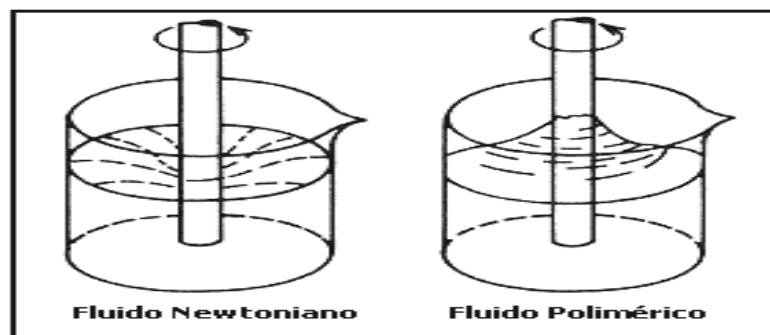


FIGURA 3.4: EFECTO DE LA FUERZA CENTRIFUGA SOBRE UN FLUIDO DE TIPO NO NEWTONIANO.

En la figura 3.4, se observa que si ponemos agua en un vaso de precipitados y lo agitamos a una velocidad moderada con un agitador cilíndrico, en la superficie del agua alrededor del agitador se produce una depresión. En realidad el efecto podría haberse anticipado, pues por la acción del agitador el agua también empieza a girar y la fuerza centrífuga tiende a desplazar hacia las paredes del recipiente. El resultado neto es acumular fluido en las paredes y producir una deficiencia alrededor del cilindro, la cual se manifiesta en la depresión central. Para un fluido NN sucede precisamente el efecto contrario: el fluido no sólo se concentra alrededor del agitador. A este fenómeno se le conoce como efecto Weissenberg y fue descubierto por Karl Weissenberg en Inglaterra durante la segunda Guerra Mundial.

Si ahora repetimos el experimento anterior pero haciendo girar en el fondo del vaso un disco de diámetro igual al del recipiente, observamos que la superficie del agua se deprime, en tanto que en el caso del líquido NN se produce una protuberancia en su superficie (Figura 3.5). Una variante de este experimento consiste en hacer girar el mismo disco en la superficie del líquido. Para ambos fluidos observamos que se superponen dos flujos.

El flujo primario es tangencial al disco y sigue la dirección de su rotación. Pero el flujo que se superpone a éste, y que llamaremos secundario, es diferente en ambos casos. En el agua, el disco en rotación tiende a desplazar al líquido hacia las paredes y luego, cerca de ellas, realiza un giro hacia el fondo del vaso para finalmente emerger hacia arriba cerca del eje de rotación del disco. En el caso del fluido polimérico, el flujo secundario es idéntico en naturaleza, pero ocurre en sentido contrario. Este efecto fue observado por primera vez por C.T. Hill en 1972 (Figura 3.6).

Una de las diferencias más notables entre los fluidos newtonianos y los poliméricos o NN, es que los últimos tienen "memoria". Como ya mencionamos antes, esto significa que la deformación del material a un cierto instante de tiempo depende no sólo de los esfuerzos aplicados en ese instante, sino también de las deformaciones y esfuerzos previos. Esta característica se observa en otro experimento en el que tales fluidos se "bombean" a lo largo de un ducto cilíndrico horizontal (EVERETT, 1988).

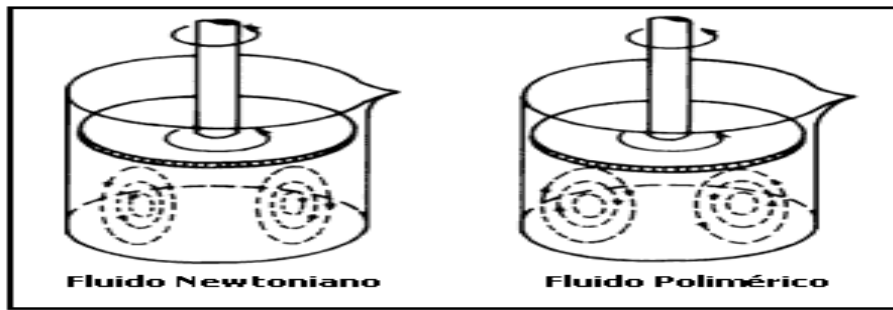


FIGURA 3.5: EFECTO DE DEPRESIÓN SUPERFICIAL DE UN FLUIDO NN



FIGURA 3.6: VÓRTICES INTERIORES PARA UN FLUIDO NN.

Imaginemos que ponemos ambos fluidos en tubos de vidrio y que, al momento de introducirlos en ellos, agregamos una traza de colorante para poder observarlos fácilmente. Ahora supongamos que seguimos el movimiento del colorante por un tiempo durante el cual lo fotografiamos, y después apagamos la bomba. Primero vemos que la marca inicial de colorante se deforma, pues el fluido se mueve más rápido en el centro del tubo que cerca de sus paredes. Además, notamos que, en el caso del agua, ésta simplemente se detiene al desconectar la bomba, lo que concuerda con lo que, intuitivamente esperamos, esto es, que al desaparecer la causa que produce las deformaciones, el fluido ya no se deforma. Sin embargo, no es esto lo que ocurre en el caso del fluido NN, donde se observa que aparece un efecto de retroceso, una tendencia a regresar a situaciones previas y gradualmente pasa al estado de reposo. Claramente, esto significa que, aun después de haber desconectado la bomba, el fluido No-Newtoniano sigue deformándose, pero

ahora en sentido inverso debido a los esfuerzos que se produjeron en tiempos anteriores al detener la bomba. Esta es una manifestación de la memoria del fluido y en reología se le llama *efecto de memoria desvaneciente*, pues se observa que el fluido no recupera totalmente sus configuraciones previas, lo que significa que la memoria se desvanece (relaja) a medida que el tiempo transcurre (ver figura 3.7), los perfiles con líneas oscuras representan, de forma esquemática, el comportamiento del fluido antes de y en el momento de desconectar la bomba.

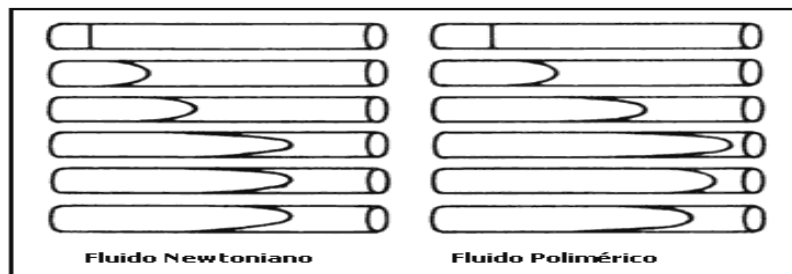


FIGURA 3.7: EFECTO DE MEMORIA EN FLUIDOS NN.

Otro efecto un tanto sorprendente es el comportamiento que exhibe un fluido polimérico al emerger de un orificio. En el caso del agua, ésta no se expande ni se contrae, pero un líquido NN puede "hincharse" y aumentar su sección transversal hasta por un factor de cinco!, este efecto podemos observarlo fácilmente al oprimir un tubo de pasta dental (Figura 3.8).

Pero hay todavía otros efectos, no menos sorprendentes, que son fáciles de observar. Imaginemos que llenamos con agua un tubo relativamente ancho el cual está conectado por uno de sus extremos a otro tubo de diámetro menor, y que dejamos que el agua fluya lentamente del primero al segundo cuando están colocados verticalmente.

En el caso del agua no vemos otra cosa, aparte de que ésta aumenta su velocidad al pasar al tubo más angosto. En cambio, con el fluido NN observamos que se forman pequeños vórtices (remolinos) en la vecindad de la conexión entre ambos tubos. Las partículas de fluido atrapadas en ellos nunca caen al tubo menor.

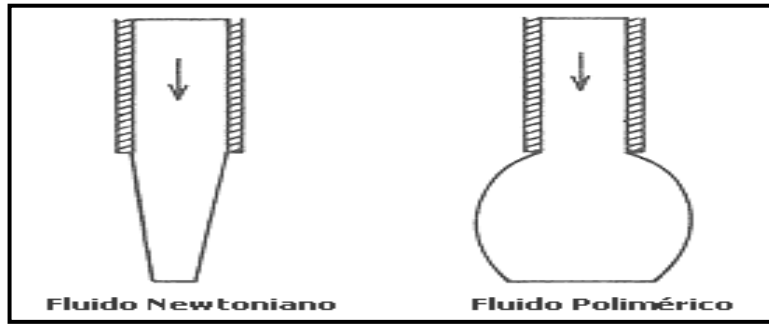


FIGURA 3.8: EFECTO DE HINCHAMIENTO EN UN FLUIDO NN.

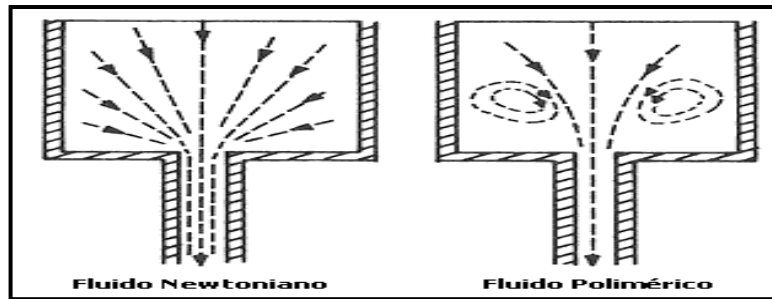


FIGURA 3.9: EFECTOS DE VÓRTICE A LA SALIDA DE UN RECIPIENTE EN FLUIDOS NN.

En el caso del agua no vemos otra cosa, aparte de que ésta aumenta su velocidad al pasar al tubo más angosto. En cambio, con el fluido NN observamos que se forman pequeños vórtices (remolinos) en la vecindad de la conexión entre ambos tubos. Las partículas de fluido atrapadas en ellos nunca caen al tubo menor.

3.1 Caracterización de los aceites lubricantes desde el punto de vista reológico de Aceites Lubricantes

El peso molecular de una sustancia es un número que representa en forma aproximada, el número de veces que el peso de la molécula en cuestión excede el peso de un átomo de hidrógeno. Puede decirse entonces que la relación constitutiva de Newton describe bien el flujo de fluidos cuyas moléculas tienen pesos moleculares máximos de 1,000, aproximadamente. Sin embargo, cuando las moléculas de un fluido son muy pesadas, por ejemplo con

pesos moleculares mayores de 100,000 la ley de viscosidad de Newton ya no describe adecuadamente el flujo de estos fluidos; las relaciones constitutivas ya no son tan simples, pues dejan de ser instantáneas, aunque todavía pueden ser lineales. A esta clase de fluidos se les llama "no newtonianos".

Por tanto en esta categoría entran los aceites lubricantes, los cuales su característica esencial del sistema es que sus moléculas son muy pesadas, con pesos moleculares entre 100,000 y 100,000,000 por eso se les llama *macromoléculas*. Entre estos materiales pueden también mencionarse la madera, resinas naturales, hules, fibras como la lana, la seda o el algodón, etc. Por otra parte, muchos minerales, como el cuarzo y el diamante, son polímeros inorgánicos y una gran variedad de productos de la industria moderna, como el concreto, la porcelana, las fibras textiles, el vidrio, hules y plásticos, son polímeros puros o están compuestos en gran parte por polímeros. La palabra polímero se deriva de dos vocablos griegos, *polys* que significa muchos y *meros*, parte o unidad. Como su nombre lo indica, las moléculas de un polímero están formadas por muchas unidades o monómeros de bajo peso molecular que se mantienen unidos entre sí por fuerzas intermoleculares muy intensas llamadas *enlaces covalentes* (EVERETT, 1988).

A diferencia de los fluidos newtonianos, el estudio de la dinámica de los fluidos No-Newtonianos (NN) es relativamente reciente, pues se inició alrededor de 1950 motivado, precisamente, por el vertiginoso desarrollo de la industria. Y aunque es un campo de investigación muy activo, aún está en proceso de desarrollo. La dinámica de los fluidos No-Newtonianos pretende, a un nivel macroscópico, construir las relaciones constitutivas apropiadas que permitan describir y entender, por ejemplo, los flujos y fenómenos asociados con las aplicaciones industriales de los mismos. Hemos mencionado, sin justificarlo, que la relación constitutiva lineal de Newton es inadecuada para describir el flujo de líquidos No-Newtonianos. Existen numerosos experimentos que claramente indican que el flujo de los fluidos newtonianos es cualitativamente diferente al de los NN (EVERETT, 1988).

La reología ha comprobado que estas diferencias de comportamiento dinámico pueden entenderse y explicarse cambiando tanto la relación

constitutiva lineal de Newton como las ecuaciones de Navier-Stokes. Sin embargo, en la mayor parte de los procesos industriales la mayoría de los problemas que se presentan se complican por la presencia de transferencia de calor. Esto implica que la ecuación de conservación de energía debe acoplarse con la del ímpetu y la de masa, de manera que la complejidad física inherente a la estructura de las ecuaciones constitutivas aumenta considerablemente (REOLOGIA, 2000).

A nivel molecular (microscópico) hay diferencias importantes entre los fluidos newtonianos, compuestos por moléculas pequeñas, y los fluidos macromoleculares o poliméricos. Diversas características de la arquitectura macromolecular influyen y determinan sus propiedades de flujo. El hecho es importante, pues se observa que las propiedades reológicas son muy sensibles a esta diversidad de pesos moleculares. Otra característica esencial es que, aun sin fluir, las moléculas de fluidos NN pueden adoptar un número enorme de configuraciones, y como el flujo las altera estirando o alineando las moléculas, los cambios de configuración a su vez influyen en las propiedades en flujo.

3.1.1 Parámetros físicos Aplicados en Reología para Aceites Lubricantes

La rama de la mecánica que se ocupa de formular y estudiar las relaciones constitutivas de los materiales es la reología, palabra que proviene del vocablo griego *reos*, que significa fluir, y es la ciencia que estudia la deformación y el flujo.

Cuando al someter una muestra de material a un estudio de deformación y a un flujo de materia se puede obtener información cualitativa y cuantitativa, lo que permite caracterizar la materia y definir parámetros reológicos como viscosidad, consistencia, y propiedades elásticas de este. Esto es como un material responde a la acción de una fuerza. Por ejemplo, la miel podrá fluir a través del orificio de un embudo de vidrio, mientras esto no ocurrirá con la mayonesa. Sin embargo la mayonesa es mucho más fácil de esparcir sobre una rodaja de pan que la miel (MODELOS REOLOGICOS, 2000).

Las imperfecciones en los arreglos tridimensionales de los átomos, característicos de los sólidos cristalinos, proveen mecanismos de deformación basados en la movilidad interna a nivel molecular, los cuales implican cambios en la cantidad de energía requerida para deformar el material. Por ejemplo, si se trata de un sólido cristalino, la presencia de imperfecciones y dislocaciones en el arreglo cristalino tenderá a disminuir la energía requerida para deformar el material a tensión, pero tenderá a aumentar la energía requerida para deformar el material por impacto.

Un cuerpo es deformable porque su energía de cohesión, debida a las interacciones interatómicas e intermoleculares, es finita y por consiguiente puede ser superada al aplicársele un esfuerzo suficientemente grande.

En el caso de líquidos y gases, las energías de cohesión son cada vez menores y por consiguiente estos cuerpos son más fácilmente deformables bajo ciertos esfuerzos. La reología provee las herramientas para entender estos comportamientos diferentes.

El movimiento de las capas establece un gradiente de velocidad en el fluido. Esta geometría puede ser usada para definir algunos parámetros reológicos tales como:

a) Esfuerzo de corte ó cizalla (τ): Se define como la fuerza por unidad de área necesaria para alcanzar una dada deformación.

$$\tau = \frac{F \text{ (fuerza)}}{A \text{ (área)}} \quad \text{Ecc. 3.1}$$

b) Velocidad de Corte ó Cizalla (γ): Se define como el cambio de velocidad v a través de la distancia h entre los dos platos. Las unidades son 1/segundo. La velocidad de corte se incrementa a medida que la velocidad del plato superior aumenta y la distancia entre los dos platos se hace más pequeña.

$$\gamma = \frac{\partial v}{\partial h} = \frac{cm/s}{cm} = s^{-1} \quad \text{Ecc. 3.2}$$

El fluido entre los platos resiste el movimiento del plato superior y esta resistencia al flujo es determinada por la viscosidad del fluido (η).

c) Viscosidad (η): Se define como la relación entre el esfuerzo de corte aplicado y la velocidad de corte adoptada por el fluido. La viscosidad en el sistema de unidades cgs se expresa en Poise.

$$\eta(\text{viscosidad}) = \frac{\tau(\text{Esfuerzo de corte})}{\gamma(\text{Velocidad de corte})} = \text{Poise ó Pas} \quad \text{Ecc. 3.3}$$

Existen dos tipos diferentes de comportamientos reológicos bien marcados: Fluidos Newtonianos y Fluidos No Newtonianos.

d) Esfuerzo: Un elemento de una porción de materia continua, el cual se tomara como sistema, puede estar sometido a fuerzas de origen diversos: gravedad, fuerzas internas (viscosas en fluidos fluyendo o tensiones internas debidas al procesamiento de sólidos) y distribución de presiones externas aplicadas al sistema.

En términos de los efectos sobre la deformación del material, no interesa conocer cada término dinámico de los componentes normales sino que la diferencia de esfuerzos normales en diferentes direcciones. Los valores de la diferencia de esfuerzos normales en diferentes direcciones se deben únicamente a diferencias en los componentes dinámicos, dado que la presión es isotópica. Puesto que tales componentes dinámicos no son determinados por las fuerzas externas sino que resultan del tipo de deformación del material, se consideran propiedades reológicas del material que las exhibe (BINDER, 1991).

4.0 ECUACIONES APLICADAS PARA DESCRIBIR EL COMPORTAMIENTO DE FLUIDOS NO NEWTONIANOS.

En el primero la viscosidad es constante independientemente del esfuerzo de corte al cual se somete el fluido. Y en el segundo la viscosidad depende del esfuerzo de corte aplicado. Un gráfico de esfuerzo de corte ó viscosidad en función de la velocidad de corte se conoce como reograma. El reograma para un fluido Newtoniano es una línea recta cuya pendiente es la Viscosidad. La mayoría de los materiales con alguna significancia industrial son no Newtonianos. Hay varios tipos de comportamientos no Newtoniano (REOLOGIA, 2000).

Los fluidos en los cuales el esfuerzo de corte no es directamente proporcional a la relación de deformación son no newtonianos. Estrictamente hablando la definición de un fluido es válida solo para materiales que tienen un esfuerzo de deformación cero. Por lo común, los fluidos no newtonianos se clasifican con respecto a su comportamiento en el tiempo, es decir, pueden ser dependientes del tiempo o independientes del mismo.

Un gran número de ecuaciones empíricas se han propuesto para modelar las relaciones observadas entre τ_{yx} y du/dy para fluidos independientes del tiempo. Pueden representarse de manera adecuada para muchas aplicaciones de la ingeniería mediante un modelo de la ley de potencia, el cual se convierte para un flujo unidimensional en

$$\tau_{yx} = k \cdot (du/dy)^n \quad \text{Ecc. 4.1}$$

Donde el exponente n se llama índice de comportamiento del flujo y k el índice de consistencia. Esta ecuación se reduce a la ley de viscosidad de newton para $n = 1$ y $k = \mu$.

Si la ecuación 3.4 se rescribe de la forma

$$\tau_{yx} = k \cdot |du/dy|^{n-1} \cdot (du/dy) = \eta \cdot (du/dy) \quad \text{Ecc. 4.2}$$

Entonces $\eta = k |du/dy|^{n-1}$ se denomina **viscosidad aparente**. La mayor parte de los fluidos no newtonianos tienen viscosidades aparentes que son relativamente altas comparadas con la viscosidad del agua (REOLOGIA, 2000).

Los fluidos en los cuales la viscosidad aparente disminuye con el aumento de la relación de deformación ($n < 1$) se llaman **seudoplásticos**. Y es donde se clasifican a los aceites lubricantes.

Casi todos los fluidos no newtonianos entran en este grupo; los ejemplos incluyen soluciones poliméricas, suspensiones coloidales y pulpa de papel en agua. Si la viscosidad aparente aumenta con el incremento de la relación de deformación ($n > 1$) el fluido se nombra **dilatante**. La viscosidad aumenta a medida que aumenta el esfuerzo de corte al cual es sometido el fluido (REOLOGIA, 2000).

El fluido que se comporta como un sólido hasta que se excede un esfuerzo de deformación mínimo (τ_{ψ}) y exhibe subsecuentemente una relación lineal entre el esfuerzo y la relación de deformación se conoce como **plástico de Bingham** o ideal.

El estudio de fluidos no newtonianos es aún más complicado por el hecho de que la viscosidad aparente puede depender del tiempo. Los fluidos **tixotrópicos** muestran una reducción de n con el tiempo ante la aplicación de un esfuerzo de corte constante. Los fluidos **reopéticos** muestran un aumento de n con el tiempo. Después de la deformación, algunos regresan parcialmente a su forma original cuando se libera el esfuerzo aplicado. A tales fluidos se les llama **viscoelásticos**.

En gran medida la razón para un comportamiento no newtoniano se debe a la presencia de partículas. La figura 4.1, muestra el flujo de una partícula sometida a un esfuerzo de corte. El campo de corte generado en el fluido establece un gradiente de velocidad a través de la partícula. Sin embargo siendo rígida la partícula puede moverse a través del fluido sólo a una única velocidad. Por esta razón, el gradiente de velocidad generado en el fluido provoca la rotación de la partícula.

La energía usada para rotar la partícula disminuye la energía disponible para la fluencia del líquido. Por lo tanto la presencia de la partícula causa un incremento en la viscosidad del fluido. Lo cual significa que se necesita mayor fuerza para alcanzar la misma fluencia que se alcanzaría en el líquido sin partículas.



FIGURA 4.1: FLUJO DE UNA PARTÍCULA SOMETIDA A UN ESFUERZO DE CORTE

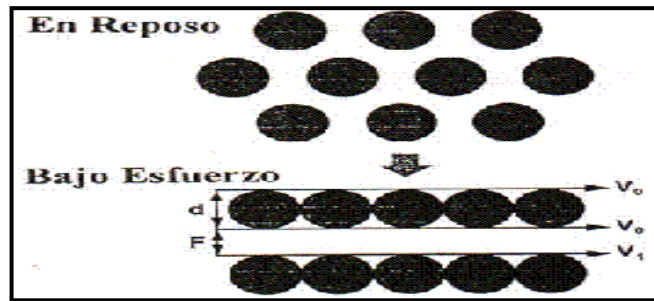


FIGURA 4.2: LA FUENTE DE COMPORTAMIENTO PSEUDOPLÁSTICO DE UNA SUSPENSIÓN.

Cuando un fluido es sometido a un esfuerzo de corte ó cizallamiento las partículas se orientan por si mismas en capas las cuales pueden fluir muy fácilmente causando una disminución de la viscosidad. Si las partículas interaccionan para formar grandes agregados se puede observar un comportamiento plástico. Esto significa que por debajo de una cierta fuerza de cizalla (τ) la suspensión se comporta como un sólido. A medida que la fuerza de cizalla aumenta la estructura interna del fluido se rompe y el sistema

comienza a fluir. Mayores incrementos en la fuerza de cizalla causa la ruptura de aglomerados de partículas.

Este fenómeno aumenta la fracción de volumen de la suspensión y por lo tanto la viscosidad (comportamiento dilatante) Si las partículas interactúan para formar grandes agregados se puede observar un comportamiento plástico. Esto significa que por debajo de una cierta fuerza de cizalla (τ) la suspensión se comporta como un sólido. A medida que la fuerza de cizalla aumenta la estructura interna del fluido se rompe y el sistema comienza a fluir. Mayores incrementos en la fuerza de cizalla causa la ruptura de aglomerados de partículas como se muestra en la figura 4.3 (BARNES, 1989).

Cuando las fuerzas responsables del movimiento cesan, el fluido puede exhibir tixotropía dependiendo de la velocidad a la cual las partículas se vuelven a asociar.

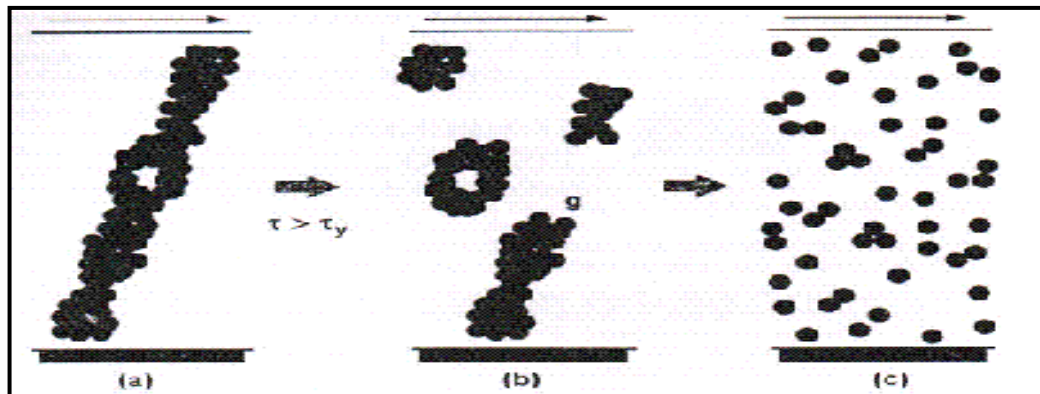


FIGURA 4.3: RUPTURA DE AGLOMERADOS DE PARTÍCULAS.

Un sistema tixotrópico exhibe un descenso en viscosidad como consecuencia de la acción de una fuerza de cizalla. Los materiales viscoelásticos son aquellos que presentan un comportamiento dual. Esto significa que el material posee una componente elástica (como sí fuera un sólido) y una componente de flujo.

El comportamiento elástico puede ser modelado por un resorte el cual almacena energía a través de su propia deformación la cual es liberada

posteriormente. Un campo de flujo elongación al es aquel en el cual un material sufre aceleración en la dirección del flujo, mientras que en un campo de flujo de corte los cambios en la velocidad del fluido se producen en una dirección perpendicular al flujo. Una cadena polimérica sometida a un flujo elongacional será extendida en la dirección del flujo.

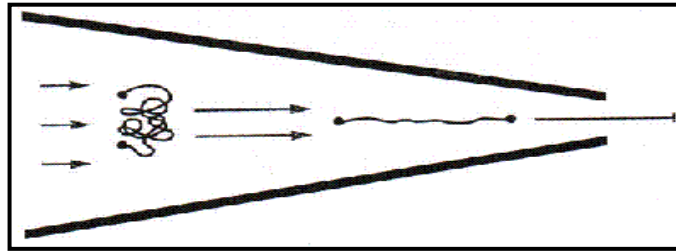


FIGURA 4.4: FLUIDO SOMETIDO A FLUJO ELONGACIONAL.

El estado normal de un polímero, el cual puede ser denominado estado de descanso es el de un ovillo de manera tal que se resiste a ser extendido por fuerzas aplicadas en el sentido del flujo causando un incremento en la viscosidad elongacional.

La viscosidad se mide utilizando instrumentos denominados reómetros ó viscosímetros. Hay dos métodos para medir viscosidad. El primero es variar la deformación (velocidad de corte) y medir la fuerza resultante. El segundo es aplicar una fuerza controlada a la muestra y medir la deformación resultante. Este tipo de instrumentos es de diseño más moderno y especial para mediciones a muy bajas velocidades de corte.

Esto significa que la viscosidad medida no es la viscosidad absoluta la cual es una propiedad intrínseca del material independiente del tipo de instrumento utilizado para la medición. Los instrumentos para investigación y desarrollo poseen una geometría de corte controlada lo cual significa que la velocidad de corte puede ser controlada y variada para obtener datos de viscosidad a diferentes velocidades de corte.

5.0 PLAN DE LA INVESTIGACIÓN PARA LA EVALUACION DE LAS CARACTERISTICAS DE CALIDAD EN PROCESOS DE AGITACION Y MEZCLA DE FLUIDOS NO-NEWTONIANOS

El propósito de esta investigación se centra en el diagnóstico del proceso de elaboración de un fluido no-newtoniano, por medio del comportamiento de las características de calidad del producto y del proceso.

Una incesante disminución de los errores, un incesante mejoramiento de la calidad, significan costos cada vez más bajos, menos reproceso en la producción, menor desperdicio de materiales, de tiempo en equipos, herramientas y de esfuerzo humano.

Las bases estadísticas para la elaboración del diagnóstico y la experimentación se presentan en el anexo B.

Para elaborar una propuesta mejoramiento del proceso, se comenzara con identificar los potenciales de mejora del proceso de producción. Buscando las causas y encontrando la manera de prevenirlas y darle solución.

El plan de mejoramiento incluye las siguientes etapas:

- a) Entender el proceso (por medio de la investigación bibliográfica)
- b) Diagnosticar los orígenes de los factores que afectan las características de producción (Diagnostico del proceso por medio del análisis de Histogramas)
- c) Análisis de Causa y Efecto
- d) Propuesta de mejoras del proceso

Para realizar una secuencia de medición se debe llevar un proceso de control estadístico, que permita eliminar fuentes de variación y con las que se pueda identificar las fuentes de variación, permitiendo predecir y desarrollar soluciones antes de aislar las causas fundamentales del problema.

5.1 Diagnóstico de procesos de agitación y mezcla en fluidos no-newtonianos con especificación en Aceites Lubricantes

En el presente trabajo, ambos procesos de producción se efectúan en tanques de dimensiones diferentes, pero con geometría y condiciones similares de mezclado, en los que se elaboran aceites con propiedades viscométricas distintas. Por razones de estudio se han seleccionado tres de estos tanques a los que se les identificará como tanque A, B, y C. El Aceite tipo automotriz se elaborara en el tanque A, para nuestro diagnóstico y el de especificación marina se elabora en los tanques B, y C.

Las características de calidad que se usaran para diagnosticar el proceso serán la viscosidad cinemática del producto terminado, y el tiempo total de mezclado (60-90 minutos). El diagnóstico por tanto se realiza en base a las mediciones de diferentes datos de viscosidad cinemática del producto terminado y al tiempo de mezclado de cada lote que se elabora. (Proceso de elaboración de aceites, sección 1.2)

Después de investigar, y recabar información se procedió a tabular y graficar, los datos obtenidos para el diagnóstico (ver datos en anexo C), luego se realiza la interpretación de resultados, haciendo uso de valores promedios máximos y mínimos, permitiendo inferir en el comportamiento de los datos experimentales antes medidos y monitoreados.

El aceite automotriz es un aceite de motor que protege de la fricción, de la perdida de energía o cuando existe generación de calor. Es un aceite diseñado para la maquinaria de automóviles, en los que se tiene un rango SAE de viscosidad específica para cada aplicación, en nuestro caso se selecciona un rango de viscosidad de un SAE 40. El aceite tipo marino, es para motores de dos tiempos, en los que la detergencia y el nivel de aditivos requeridos es mayor, pero con similares condiciones de viscosidad que el aceite tipo automotriz. Para el diagnóstico se ha seleccionado una aplicación específica de cada tipo de aceite en análisis.

En las secciones 5.1.1 a la 5.1.4 se analizará el funcionamiento de cada uno de los tanques seleccionados para el estudio las variables respuesta viscosidad y tiempo total del proceso de mezclado. El diagnóstico de los procesos de mezclado se hará a través del análisis de Histogramas e Índices de Capacidad en procesos de agitación y mezcla.

5.1.1 Análisis de procesos de agitación y mezcla para fabricación de Aceite Automotriz

Como se mencionó anteriormente el Aceite Automotriz se elabora en el tanque A. Para el análisis del proceso de mezclado se tomaron datos de viscosidad cinemática y tiempo total de mezclado de 50 diferentes lotes de aceites producidos en este tanque.

En la figura 5.1, se representa el histograma construido con 50 datos, de las mediciones de viscosidad cinemática del aceite automotriz en el tanque A. Los límites de especificación de viscosidad cinemática del Aceite Automotriz son de 13.5 a 15 cSt.

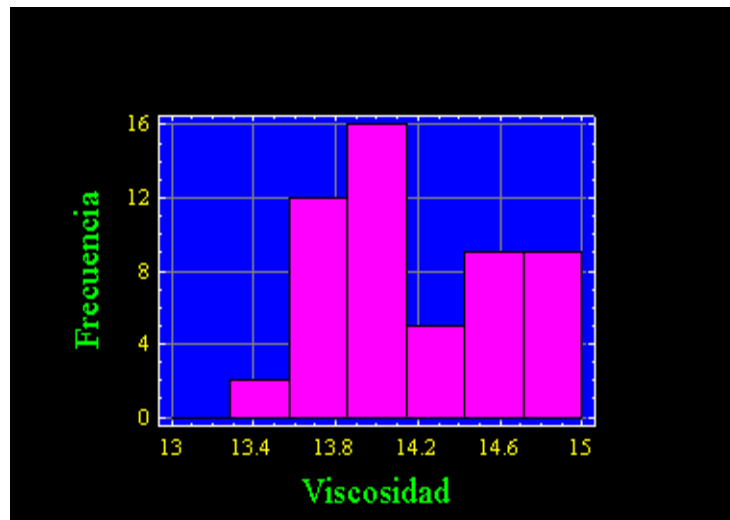


FIGURA 5.1 HISTOGRAMA DEL DIAGNÓSTICO PARA EL TANQUE A

Como puede observarse en el grafico 5.1 los valores de viscosidad, se encuentran dentro de los límites de especificación. Sin embargo, el histograma es del **tipo doble pico** lo que indica que la frecuencia es baja cerca del centro del rango de la información, y que existe un pico a cada lado. Este grafico se da cuando se mezclan dos distribuciones que tienen valores de la media diferentes.

Además, los estadísticos asociados a la muestra de 50 determinaciones de viscosidad se presentan resumidos en el cuadro 5.1.

CUADRO 5.1 ESTADISTICOS PARA LA VISCOSIDAD CINEMATICA, EN TANQUE A

PROPIEDAD	VALOR	PROPIEDAD	VALOR
MEDIA (X)	14.1823 cSt	CURTOSIS (CC)	-1.9683
VARIANZA (S)	0.4204	ASIMETRIA (CA)	0.4834
DESVIACION ST (S ²)	0.1767	MEDIANA	14.03 cSt
MODA	14.0 cSt	MINIMO	13.45 cSt
		MAXIMO	14.85 cSt

Los valores de confiabilidad para la media aritmética con un 95% son:

$$X = 14.1823 \pm 0.115881 [14.0664, 14.2981]$$

$$S = [0.3529, 0.5202]$$

En la figura 5.2, se presenta el histograma construido con las mediciones de tiempo de mezclado de 50 lotes producidos de aceite automotriz. El límite de especificación para el tiempo de mezclado del tanque A es de 60 minutos.

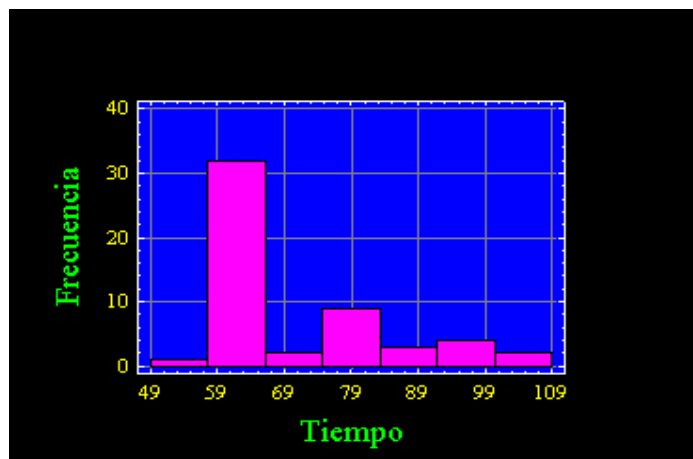


FIGURA 5.2 HISTOGRAMA DEL DIAGNÓSTICO PARA EL TANQUE A

El histograma de la figura 5.2, es del **tipo pico aislado**. Es decir, que una distribución diferente, si puede representar anomalía en el proceso o error en la medición.

Además, los estadísticos asociados a la muestra de 50 determinaciones de tiempo total de mezcla se presentan resumidos en el cuadro 5.2.

CUADRO 5.2 ESTADÍSTICOS PARA EL TIEMPO TOTAL DE MEZCLA, EN TANQUE A

PROPIEDAD	VALOR	PROPIEDAD	VALOR
MEDIA (X)	68.9623 min.	CURTOSIS (CC)	1.142
VARIANZA (S)	178.383	ASIMETRIA (CA)	3.9361
DESVIACION ST (S ²)	13.356	MEDIANA	60.0 min.
MODA	60.0 min.	MINIMO	52.0 min.
		MAXIMO	105 min.

Los valores de confiabilidad para la media aritmética con un 95% son:

$$X = 68.9623 \pm 3.6814 [65.2809, 72.6436]$$

$$S = [11.2104, 16.5251]$$

El Índice de Capacidad para la variable viscosidad cinemática del Aceite Automotriz es, $C_p = 1.208$ (ver anexo B). Lo que demuestra que la capacidad del proceso es adecuada, es decir, que el proceso es capaz de producir un aceite Automotriz con una viscosidad cinemática dentro de las especificaciones, mientras que el índice de capacidad del proceso (C_p), para el tiempo de mezclado del tanque, es de 0.214, lo que indica que el proceso no es capaz de cumplir con el tiempo de mezclado especificado.

5.1.2 Análisis General de procesos de agitación y mezcla para fabricación de Aceite tipo Marino

La producción de aceites tipo Marino se lleva a cabo como ya se ha mencionado en los tanques B y C.

a) Análisis General para el aceite con especificación Marino

El aceite tipo Marino se elabora en dos tanques diferentes de mezcla, pero con dimensiones, capacidad y especificaciones semejantes. Por tal motivo se realiza un análisis combinado y después una análisis individual de cada uno de los tanques.

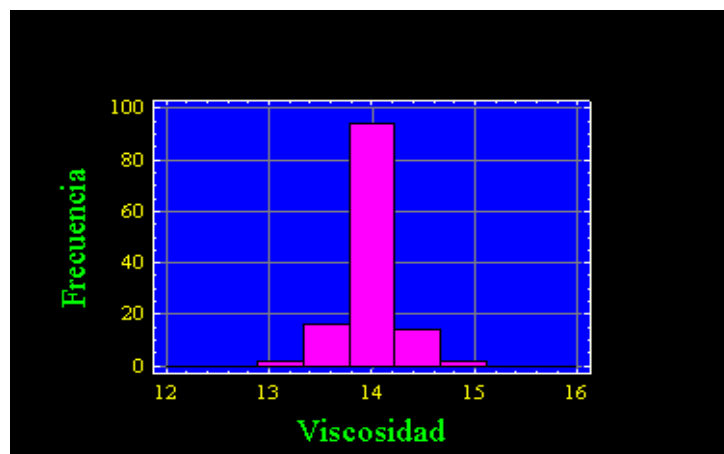


FIGURA 5.3 DIAGNÓSTICO GENERAL ACEITE MARINO

El histograma 5.3, tiene casi una distribución normal, con algunas muestras fuera del rango de especificación de viscosidad cinemática de 13.5 a

14.5 cSt. Muestra la tendencia de la viscosidad cinemática en ambos tanques de mezcla. En la figura 5.4, se representan los productos que ocasionaron retrabajos o correcciones en el producto final elaborado sin alterar los valores de calidad final del aceite.

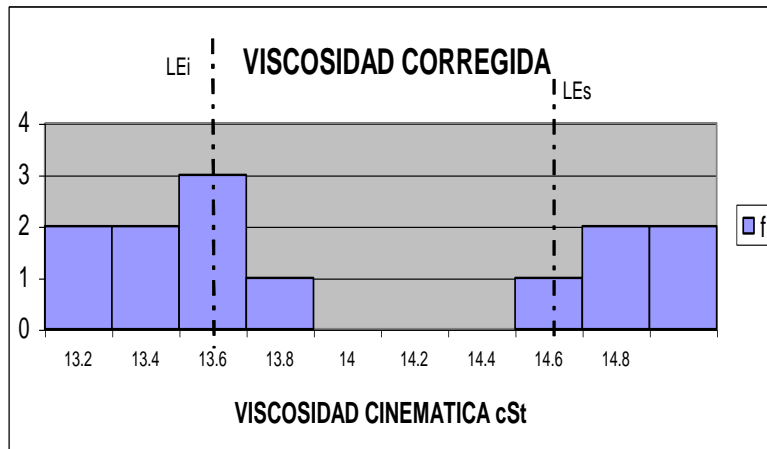


FIGURA 5.4 HISTOGRAMA QUE MUESTRA LOS PRODUCTOS QUE NO CUMPLEN CON LA ESPECIFICACIÓN.

Como se observa en la figura 5.4, la mayor tendencia se da hacia el límite inferior de especificación (13.5 cSt), lo que podría decirse que es causado por una inadecuada medición, o algún error en la adición de algún componente ocasionando faltante y error en la lectura final de los datos.

El histograma del gráfico 5.4, se dice que es del **tipo doble pico**. Indicando que la frecuencia es casi nula cerca del centro del rango de la información, y existe un pico a cada lado de la figura, además existen huecos en la figura, con una distribución asimétrica de los datos.

A partir de los datos (Ver anexo C), se obtiene: $a = 13.5$, $h = 0.2$, media (\bar{X}) = 13.9, desviación estándar de la muestra (s) = 0.716, número total de datos (n) = 13.

En general puede concluirse que no hay homogeneidad en el trabajo realizado de cada uno de los tanques B y C.

5.1.3 Análisis de procesos de agitación y mezcla para fabricación de Aceite tipo Marino

a) Análisis para el tanque B

Para su diagnóstico fue necesario tomar datos de viscosidades a diferentes tiempos de mezclado, cada uno de los datos se muestran en el anexo A.

El histograma de la figura 5.5 la distribución de los valores de los datos se da casi en el centro de los límites de especificación, pero con algunos valores fuera, se observa que la tendencia de viscosidad es entre 13.5 y 14.5 cSt, ya que esta distribución no es amplia.

Además, los estadísticos asociados a la muestra de 61 determinaciones de tiempo total de mezcla se presentan resumidos en el cuadro 5.3.

CUADRO 5.3 ESTADISTICOS PARA LA VISCOSIDAD CINEMATICA, EN TANQUE B

PROPIEDAD	VALOR	PROPIEDAD	VALOR
MEDIA (X)	14.0303 cSt	CURTOSIS (CC)	9.3806
VARIANZA (S)	0.0559	ASIMETRIA (CA)	-4.8808
DESVIACION ST (S ²)	0.2365	MEDIANA	14.02 cSt
MODA	14.0 cSt	MINIMO	13.0 cSt
		MAXIMO	14.58 cSt

Los valores de confiabilidad para la media aritmética con un 95% son:

$$X = 14.0303 \pm 0.0605819 [13.9697, 14.0909]$$

$$S = [0.2007, 0.2879]$$

A partir de la figura 5.5, se dice que es del **tipo sesgo negativo**. Indicando que el valor de la media del histograma esta localizado a la derecha del centro del rango. La frecuencia disminuye de manera brusca hacia la derecha, pero gradualmente hacia la izquierda.

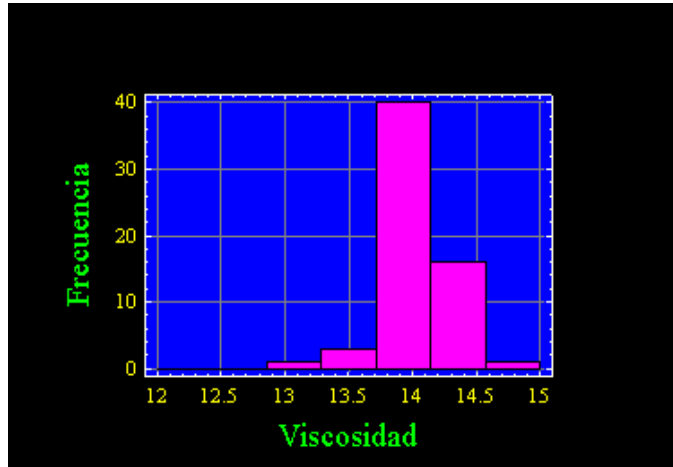


FIGURA 5.5 HISTOGRAMA DE DIAGNÓSTICO PARA TANQUE B

La media de los datos se encuentra en el centro del diagrama, en el ancho de clase con mayor número de frecuencias, por lo que se dice que los datos se encuentran en el centro de todos los valores para este tanque.

En la figura 5.6, se presenta el histograma construido con las mediciones de tiempo de mezclado de 61 lotes producidos de aceite marino. El límite de especificación para el tiempo de mezclado del tanque A es de 60 minutos.

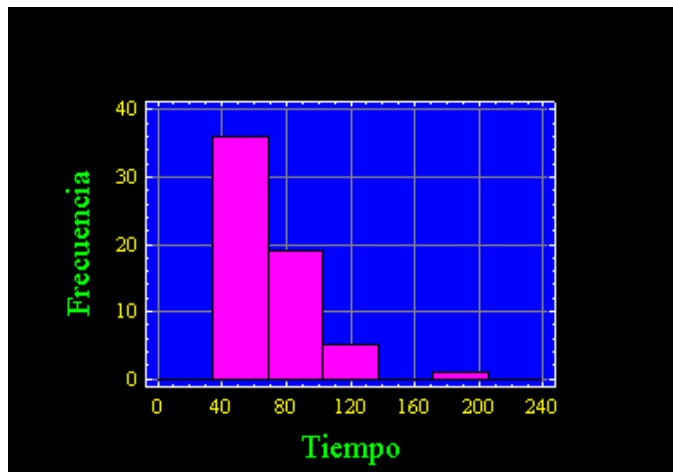


FIGURA 5.6 HISTOGRAMA DE DIAGNÓSTICO PARA TANQUE B

El histograma de la figura 5.6 indica que es del **tipo de precipicio a la izquierda**. El valor de la media del histograma está localizado al extremo

izquierdo, lejos del centro del rango. La frecuencia disminuye bruscamente a la izquierda, y gradualmente hacia la derecha. A partir de los datos se obtienen los estadísticos del cuadro 5.4.

CUADRO 5.4 ESTADISTICOS PARA EL TIEMPO TOTAL DE MEZCLA, EN TANQUE B

PROPIEDAD	VALOR	PROPIEDAD	VALOR
MEDIA (X)	73.2459 min.	CURTOSIS (CC)	20.6292
VARIANZA (S)	513.355	ASIMETRIA (CA)	9.3885
DESVIACION ST (S ²)	22.6573	MEDIANA	60.0 min.
MODA	60.0 min.	MINIMO	50.0 min.
		MAXIMO	195 min.

Los valores de confiabilidad para la media aritmética con un 95% son:

$$X = 73.2459 \pm 5.8028 [67.4431, 79.0487]$$

$$S = [19.2295, 27.5839]$$

Es necesario determinar el índice de capacidad del proceso (Cp), del tanque B, para el aceite de especificación marina, para la viscosidad se determino un valor de 0.680, lo que indica un proceso de agitación y mezcla para un aceite tipo marino que no es capaz de producir un aceite con la viscosidad cinemática especificada, mientras que el índice de capacidad del proceso (Cp), para el tiempo de mezclado, el cual da un valor de 0.189, indica que es un tanque que no es capaz de elaborar un aceite tipo marino en un tanque de este tipo.

5.1.4 Análisis de procesos de agitación y mezcla para fabricación de Aceite tipo Marino

a) Análisis para el tanque C

Este análisis es para un aceite con especificación marina, y se analizarán los efectos de la viscosidad cinemática y el tiempo total de mezcla, de 67 lotes medidos para cada aceite tipo Marino.

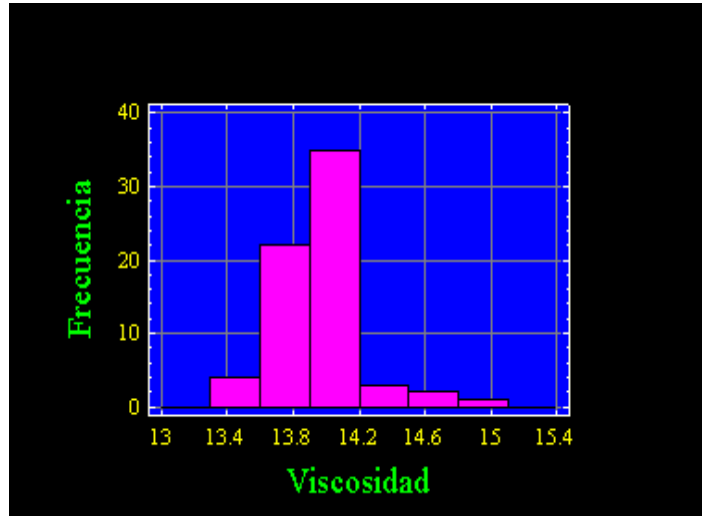


FIGURA 5.7 HISTOGRAMA DE DIAGNÓSTICO PARA TANQUE C

La distribución se da básicamente entre 13.7 y 14.15 cSt, dentro de los límites de especificación, como se aprecia en la figura 5.7

A partir de la figura 5.7 obtenido, el histograma es del **tipo doble pico**. Indicando que la frecuencia es baja cerca del centro del rango de la información, y existe un pico a cada lado. Este gráfico se da cuando se mezclan dos distribuciones que tienen valores de la media diferentes.

A partir de los datos se obtiene, la estadística de los datos tabulados en el cuadro 5.5.

CUADRO 5.5 ESTADISTICOS PARA LA VISCOSIDAD CINEMATICA, EN TANQUE C

PROPIEDAD	VALOR	PROPIEDAD	VALOR
MEDIA (X)	13.9696 cSt	CURTOSIS (CC)	8.0902
VARIANZA (S)	0.0671	ASIMETRIA (CA)	4.0261
DESVIACION ST (S ²)	0.2589	MEDIANA	13.96 cSt
MODA	14.0 cSt	MINIMO	13.33 cSt
		MAXIMO	15.0 cSt

Los valores de confiabilidad para la media aritmética con un 95% son:

$$X = 13.9696 \pm 0.06316 [13.9064, 14.0327]$$

$$S = [0.2213, 0.3121]$$

En la figura 5.8, se observa un histograma tipo **planicie, combinado con uno de pico aislado**. Las clases tienen más o menos la misma frecuencia excepto aquellas de los extremos, con un pico aislado.

Los estadísticos para los datos tabulados en la figura 5.8, se tabulan en el cuadro 5.6.

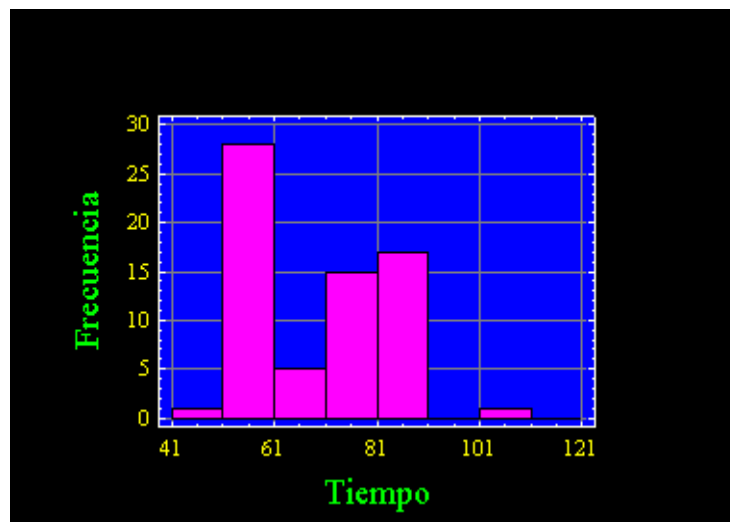


FIGURA 5.8 HISTOGRAMA DE DIAGNÓSTICO PARA TANQUE C

CUADRO 5.6 ESTADISTICOS PARA EL TIEMPO TOTAL DE MEZCLA, EN TANQUE C

PROPIEDAD	VALOR	PROPIEDAD	VALOR
MEDIA (X)	72.0149 min.	CURTOSIS (CC)	-0.8503
VARIANZA (S)	163.682	ASIMETRIA (CA)	1.3215
DESVIACION ST (S ²)	12.7938	MEDIANA	70 min.
MODA	60.0 min.	MINIMO	45 min.
		MAXIMO	110 min.

Los valores de confiabilidad para la media aritmética con un 95% son:

$$X = 72.0149 \pm 3.1207 [68.8943, 75.1356]$$

$$S = [10.9348, 15.4203]$$

Determinando el índice de capacidad del proceso (Cp), del tanque C para el aceite de especificación marina, obtenemos que el valor para la viscosidad cinemática es 0.644, lo que indica que el proceso no es capaz de producir un aceite tipo marino en el tanque de mezcla C.

5.2 Diagrama Causa-Efecto para procesos de agitación y mezcla con especificación en Aceites Lubricantes

Por medio de la figura 5.9, y de los análisis planteados se obtuvieron las siguientes conclusiones:

a) Los dos tipos de aceites (Automotriz y Marino), se producen en tanques de diferentes tamaños y medidas. Ambos productos varían en diferentes rangos de viscosidad cinemática. El primero en un rango entre 13.5-15 cSt, y el otro de 13.5-14.5 cSt.

- En el tanque A, el proceso de mezclado es capaz de producir un aceite dentro de las especificaciones deseadas, sin embargo, no es capaz de cumplir con la especificación del tiempo de proceso.

- Para los tanques B y C, resulta inadecuada la elaboración de un aceite con especificación marina, tanto para los parámetros de viscosidad como de tiempo de proceso.
 - A partir de la forma de los histogramas para los tanques B y C, la media de los valores se encuentra en el centro de ambas graficas y por tanto dentro de los límites de especificación.
 - Según los gráficos de ambos tanques la tendencia seria a aumentar el tiempo a noventa minutos, para obtener valores adecuados de índice de capacidad del proceso.
- b) La temperatura del proceso es la misma para ambos productos. Esta se monitorea para cada lote elaborado, por medio de un termómetro patrón al inicio y final de cada mezcla que se produce, determinado un rango de medición entre 80-89 °F.
- c) La velocidad de giro de rodete es fija, y no posee una tabla de control de las mediciones. El nivel de agitación varía entre los distintos tanques A, B y C. Según la naturaleza química de las materias primas, la velocidad de giro del agitador es un parámetro que se podría controlar mediante el uso de instrumentos especializados, que indiquen diferentes lecturas para la velocidad y poder determinar así, su relación con el proceso de agitación y mezcla.
- d) El tiempo de mezclado para un producto normal esta entre 90-60 minutos, cuando este se encuentra dentro de especificaciones. Caso contrario el rango esta entre los 270 minutos y mas. Pero existen otras variables (como el volumen de mezcla, condiciones climáticas y de mediciones y lectura de volumen en cada tanque) que afectan la repetitibilidad de este valor, de las que se obtiene datos mayores a 90 minutos.

- e) Se elaboran aproximadamente de tres a cuatro lotes diarios en cada tanque de estudio.

- f) La lectura final del volumen en el tanque es la misma, al final de la elaboración del producto, pero con volúmenes inferiores al volumen real del tanque, la medición de la lectura es inexacta y por la falta de iluminación no se puede determinar con exactitud.

El diagnóstico de los procesos de agitación y mezcla conlleva a la determinación de las causas y de los problemas de procesos de mezclado de los aceites lubricantes, tipo automotriz y marino lo que permite establecer los factores más importantes que afectan las características de calidad en el proceso de elaboración de aceites lubricantes (ver figura 5.9). Así también es importante la identificación de las variables que afectan el producto.

- A partir del diagrama de Causa-efecto, se concluye que, el tipo de aceite y la homogenización de sus materiales constitutivos, podría ser una de las causas que originan las variaciones en viscosidad en un fluido.

- Por medio del diagrama de causa-efecto se determinan otros factores que pueden influir en la variable de calidad, pero por razones experimentales solo se estudiarán los efectos que sean fácilmente medibles y cuantificables, durante toda la experimentación.

- Los factores que se considera pueden afectar la calidad del producto son: Tiempo total de mezcla, velocidad de giro del rodete para tanques de tipo mecánico, y la temperatura total cuando se mezclan cada una de los materiales constituyentes.

- A partir del diagnóstico, se elaborara el diseño del experimento, por medio del cual se interpretaran las causas que afectan la variable respuesta para procesos de agitación y mezcla.
- Con el diagnóstico y el análisis de las características de viscosidad cinemática y tiempo total de mezclado, se determinan los posibles factores que pueden afectar el proceso.

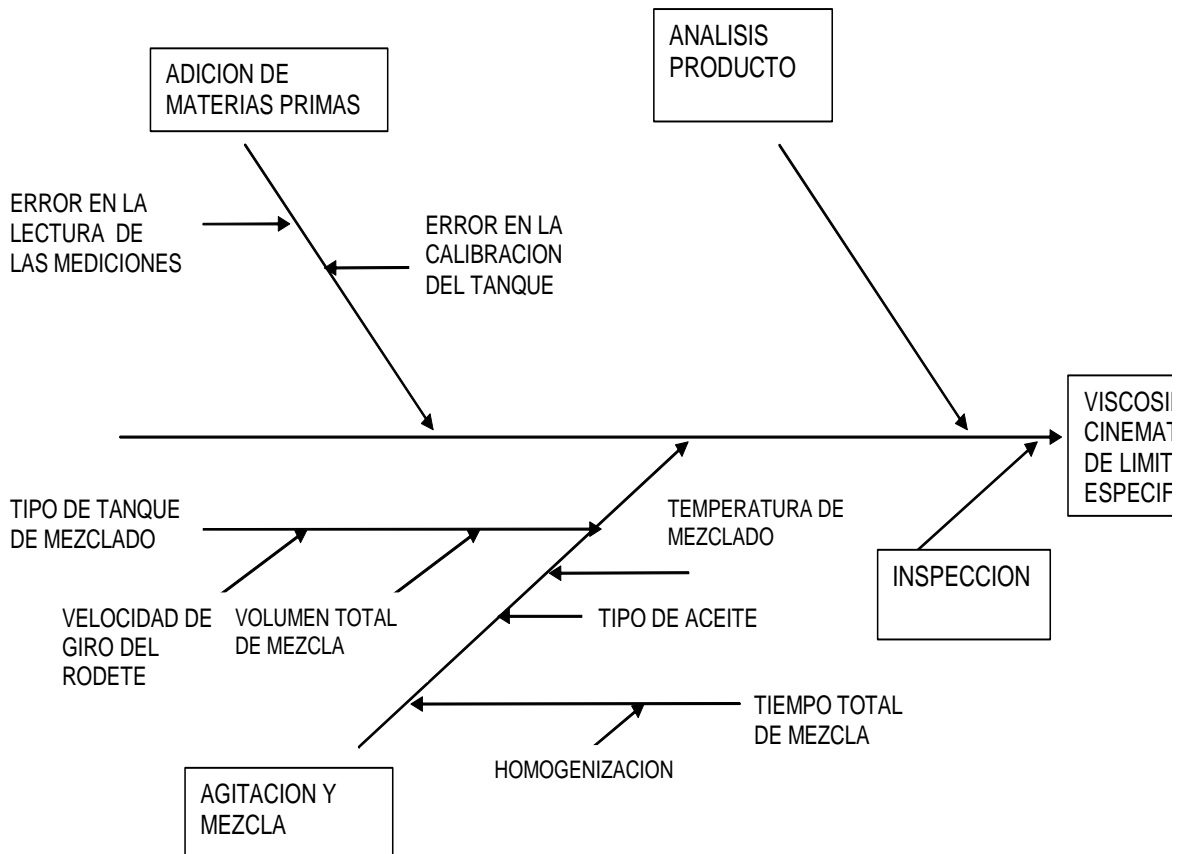


FIGURA 5.9 DIAGRAMA CAUSA-EFECTO PARA LA VISCOSIDAD CINEMATICA DEL PROCESO

6.0 DESARROLLO DE LA ETAPA EXPERIMENTAL

El siguiente trabajo experimental pretende evaluar los parámetros involucrados en procesos de agitación y mezcla, y las causas que afectan la variable de calidad, tomando como principio, los factores determinados en el diagnóstico. Se evaluarán procesos de agitación y mezcla para tanques mecánicos, en aceites de especificación diferente, y reproduciendo el proceso en general.

El desarrollo de la etapa experimental, se realiza por medio de un conjunto de técnicas matemáticas y estadísticas útiles para modelar y analizar problemas en los cuales una variable respuesta de interés está influenciada por diferentes variables.

En esta etapa se propone un diseño factorial. Por tanto se definen los objetivos de la investigación; los cuales son la elaboración de un diagnóstico de un proceso industrial de agitación y mezcla, estudiar el efecto de las variables del proceso de agitación y mezcla como son el tiempo de mezclado, la temperatura y la velocidad de giro del rodete de cada tanque en análisis sobre las características de calidad de los aceites y finalmente hacer una propuesta de mejora del proceso producción.

Es por eso que se seleccionan los factores y cada uno de los intervalos en estudio, se realiza un diseño factorial 2^k , y se determina aleatoriamente el orden los ensayos, finalmente se realiza el experimento y se obtienen los resultados.

Para la realización del diseño experimental, se deben identificar los factores que posiblemente afecten el proceso de producción. La descripción de las variables del proceso de agitación y mezcla para fluidos no newtonianos se presenta a continuación:

- A. El tiempo de mezclado y el volumen a mezclar.
- B. La velocidad de giro; en tanques con agitación mecánica.
- C. La temperatura del proceso

Las anteriores son las causas que a partir del diagnóstico del proceso se han considerado de mayor interacción con el comportamiento de la variable respuesta, y que por su naturaleza resultan ser más medibles en el sistema en estudio. También se requiere de diseñar el estudio y analizar su efecto, en los procesos de agitación y mezclado.

6.1 Descripción del proceso de Agitación y Mezcla a nivel de laboratorio

Para plantear y desarrollar una metodología que estudie el comportamiento y mejora de procesos de agitación y mezcla en la producción de fluidos no-newtonianos, fue necesario realizar un diagnóstico de las variables que ayude a determinar la incidencia en las características de calidad, del fluido extraído a partir de dicho proceso.

Por tanto a partir de los resultados obtenidos en el diagnóstico que nos sirve como una herramienta inicial en la investigación, y partir de su interpretación de resultados, se desglosan todas las causas y efectos que interfieren en el proceso, siendo este el principio para desarrollar la etapa experimental, y poder realizar mejoras en el proceso.

Para realizar el experimento a escala, se comienza con la evaluación en forma empírica de las variables, realizando diferentes etapas de experimentación, y cambiando los posibles factores que pueden afectar los datos.

7.0 ANALISIS DE VARIABLES DE LA ETAPA EXPERIMENTAL DE LAS OPERACIONES DE AGITACION Y MEZCLA EN FLUIDOS NO-NEWTONIANOS.

Con el propósito de examinar el efecto de diferentes factores sobre la viscosidad cinemática de mezclas de fluidos no-newtonianos, se generó un análisis que admita establecer los niveles de las variables involucradas para optimizar operaciones como la agitación y mezcla.

El análisis se concentrara en buscar los niveles adecuados de tiempo de mezclado, temperatura del proceso, y velocidad de giro del rodete, que permitirán encontrar un valor típico de viscosidad dentro de los límites de especificación para cada aceite elaborado.

7.1 Variables experimentales que afectan al proceso de producción

Se decide planificar un experimento 2³ para estudiar el efecto de los distintos factores sobre el proceso. La descripción de cada variable y de los factores que se piensan afecta al proceso de agitación y mezcla, se presenta en el cuadro 7.1.

CUADRO 7.1 DESCRIPCION DE VARIABLES INVOLUCRADAS EN EL PROCESO

VARIABLE	UNIDADES	DESCRIPCION
Velocidad de Giro	rpm	La velocidad a la que gira el rodete dentro del tanque durante la operación de agitación.
Tiempo total	Minutos	Tiempo total que tarda en efectuarse todo el proceso de agitación y mezcla.
Temperatura	°F	Temperatura a la que se mantiene todo el proceso.

7.2 Descripción de la Variable respuesta

La variable respuesta que se considerara en al investigación para la optimización de los parámetros en procesos de agitación y mezcla es la viscosidad cinemática medida en centí stocks. Esta se considera como una de las variables de calidad más impotentes del sistema.

La viscosidad cinemática se determinara por medio de un viscosímetro, el cual es un equipo automático de temperatura controlada (100 °C), el cual con una pequeña muestra reporta el valor de cada una de los productos elaborados en el experimento.

7.3 Diseño factorial en la evaluación de procesos de agitación y mezcla

Los datos recogidos para la experimentación deben ser consistentes, el rango de las variables debe estar dentro de un límite de control, las variables tomadas no deben producir datos correlacionados cuidando que las variables no produzcan confusión de efectos y que no existan variables ocultas.

Por eso se variaran las condiciones habituales de trabajo, para encontrar y resolver el problema de la evaluación de parámetros de operación en procesos de agitación y mezcla, tomando como punto de partida, la elaboración de aceites lubricantes de tipo automotriz y de motor estacionario.

7.3.1 Diseño de Factores, Niveles y la Matriz de diseño

Son muchos los factores que afectan la calidad de un producto terminado, como la temperatura del proceso, el tiempo real de mezclado, y la velocidad de giro del rodete. Estos interactúan sobre diferentes variables de respuesta tal es el caso del volumen mezclado, los cambios reológicos del fluido, y la homogenización de sus componentes, los cuales pueden ser medidos por, la viscosidad cinemática y por la concentración de principios activos en la mezcla final. Por razones de estudio y por la accesibilidad que representa controlar la viscosidad cinemática en forma experimental esta fue considerada como la variable respuesta de la investigación.

Se selecciona un modelo del tipo 2^3 ($2^3 = 2 \times 2 \times 2 = 8$), porque es un diseño sencillo de analizar, construir e interpretar, y además la relación entre la información obtenida y el esfuerzo experimental es excelente. Implica un total de 8 ensayos, sin replicas para el diseño. Dado que se desea obtener un número más significativo de datos para el análisis, se realizaran tres replicas para cada tipo de aceite lubricante, el número de ensayos para el diseño seleccionado es de 24.

En el cuadro 7.2 se presentan los valores de las variables a considerar para los niveles + (máximo) y - (mínimo).

CUADRO 7.2 FACTORES Y NIVELES PARA PROCESOS DE AGITACIÓN Y MEZCLA

FACTORES	ABREVIATURA	NIVELES	
		+	-
VELOCIDAD DE GIRO DE RODETE (RPM) (a)	Vf	800	400
TIEMPO DE MEZCLA (min.) (b)	tm	90	60
TEMPERATURA/PROCESO (F) (c)	Tcm	89	80

La construcción de la matriz de diseño, nos define el valor que cada factor debe tomar en cada experimento realizado. En el cuadro 7.3 se presenta la matriz para el experimento.

El orden de realización de los ensayos aleatorio, con el objetivo de protegerlo del efecto de variables no controlables en el momento en que se realice el experimento.

CUADRO 7.3 CODIFICACION DE LOS FACTORES PARA PROCESOS DE AGITACIÓN Y MEZCLA EN ACEITES DE TIPO AUTOMOTRIZ Y MARINO.

Nº de Prueba	Velocidad rpm	Tiempo min	Temperatura °F
1	400 (-)	60 (-)	80 (-)
2	800 (+)	60 (-)	80 (-)
3	400 (-)	90 (+)	80 (-)
4	800 (+)	90 (+)	80 (-)
5	400 (-)	60 (-)	89 (+)
6	800 (+)	60 (-)	89 (+)
7	400 (-)	90 (+)	89 (+)
8	800 (+)	90 (+)	89 (+)

7.4 Análisis de significancia de efectos.

Se comenzará el análisis de los datos obtenidos (cuadros 7.5 y 7.6) graficando las estimaciones de cada efecto sobre la viscosidad cinemática. La estimación se hace combinando los datos de viscosidad cinemática obtenidos a partir de la media aritmética de la replica para cada ensayo con las constantes de diseño para el modelo 2^3 que se presentan en el cuadro 7.4. A continuación, un ejemplo de cálculo de la estimación del efecto de la velocidad de giro del rodete (factor a), para el aceite de especificación marino.

Los resultados de cada valor obtenido de la variable respuesta, para cada aceite se resumen en el cuadro 7.7a y 7.7b.

$$a = -13.745 + 14.258 - 13.513 + 13.953 - 13.673 + 14.030 - 13.925 + 13.890$$

$$a = 1.275/4 = 0.3188$$

La estimación del efecto de la velocidad de giro del rodete (factor a), para el aceite de especificación automotriz, se muestra a continuación:

$$a = -14.550 + 14.040 - 12.985 + 13.495 - 14.570 + 14.078 - 12.930 + 13.510$$

$$a = 0.0875/4 = 0.02187$$

CUADRO 7.4 CONSTANTES DE CONTRASTE PARA EL DISEÑO 2^k

a	b	ab	c	ac	bc	abc
(-)	(-)	(+)	(-)	(+)	(+)	(-)
(+)	(-)	(-)	(-)	(-)	(+)	(+)
(-)	(+)	(-)	(-)	(+)	(-)	(+)
(+)	(+)	(+)	(-)	(-)	(-)	(-)
(-)	(-)	(+)	(+)	(-)	(-)	(+)
(+)	(-)	(-)	(+)	(+)	(-)	(-)
(-)	(+)	(-)	(+)	(-)	(+)	(-)
(+)	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)

CUADRO 7.5 DATOS RECOLECTADOS A PARTIR DEL DISEÑO EXPERIMENTAL, PARA UN ACEITE DE TIPO AUTOMOTRIZ

a	b	c	Media (Yijk)
400	60	80	14.550
800	60	80	14.040
400	90	80	12.985
800	90	80	13.495
400	60	89	14.570
800	60	89	14.078
400	90	89	12.930
800	90	89	13.510

CUADRO 7.6 DATOS RECOLECTADOS A PARTIR DEL DISEÑO EXPERIMENTAL, PARA UN ACEITE DE TIPO MARINO

a	b	c	Media (Yijk)
400	60	80	13.745
800	60	80	14.258
400	90	80	13.513
800	90	80	13.953
400	60	89	13.673
800	60	89	14.030
400	90	89	13.925
800	90	89	13.890

CUADRO 7.7a CALCULOS DE LOS EFECTOS PARA LOS DATOS DEL DISEÑO DE EXPERIMENTOS

TIPO DE ACEITE: MARINO	
A) Calculo de la interacción entre el Tiempo de Mezcla y La Temperatura Nivel 1: Efecto del tiempo de mezcla / Temperatura Nivel -1: Efecto del tiempo de mezcla / Temperatura	$bc = 0.1625$ $b = 0.05625$ $b = -0.26875$
B) Calculo de la interacción entre la Velocidad de giro del Rodete y La Temperatura Nivel 1: Efecto de la Velocidad de giro del Rodete / Temperatura Nivel -1: Efecto de la Velocidad de giro del Rodete / Temperatura	$ac = -0.1575$ $a = 0.16125$ $a = 0.47625$
C) Calculo de la interacción entre la Velocidad de giro del Rodete y El Tiempo de mezcla del proceso Nivel 1: Efecto de la Velocidad de giro del Rodete / Tiempo de mezcla Nivel -1: Efecto de la Velocidad de giro del Rodete / Tiempo de mezcla	$ab = -0.11625$ $a = 0.2025$ $a = 0.4350$

CUADRO 7.7b CALCULOS DE LOS EFECTOS PARA LOS DATOS DEL DISEÑO DE EXPERIMENTOS

TIPO DE ACEITE: AUTOMOTRIZ	
A) Calculo de la interacción entre el Tiempo de Mezcla y La Temperatura Nivel 1: Efecto del tiempo de mezcla / Temperatura Nivel -1: Efecto del tiempo de mezcla / Temperatura	bc = -0.024375 b = -1.10375 b = -1.0550
B) Calculo de la interacción entre la Velocidad de giro del Rodete y La Temperatura Nivel 1: Efecto de la Velocidad de giro del Rodete / Temperatura Nivel -1: Efecto de la Velocidad de giro del Rodete / Temperatura	ac = 0.021875 a = 0.04375 a = 0.0
C) Calculo de la interacción entre la Velocidad de giro del Rodete y El Tiempo de mezcla del proceso Nivel 1: Efecto de la Velocidad de giro del Rodete / Tiempo de mezcla Nivel -1: Efecto de la Velocidad de giro del Rodete / Tiempo de mezcla	ab = 0.523125 a = 0.5450 a = -0.50125

7.5 Análisis de los resultados de cada efecto aplicado a cada Aceite analizado

Seguidamente se hace la interpretación de cada efecto sobre la variable respuesta que se obtuvo para cada producto, después de realizado el experimento.

7.5.1 Análisis para aceite de tipo marino

CUADRO 7.8 EFECTO PRINCIPAL PARA CADA FACTOR DEL PROCESO.

EFECTO DE a	0.3188
EFECTO DE b	-0.1062
EFECTO DE c	0.01225

La variabilidad en la viscosidad se ve afectada por cada uno de los efectos, se observa un valor significativo más alto para el factor "a" (velocidad de giro del rodete).

7.5.2 Análisis para aceite de tipo automotriz

CUADRO 7.9 EFECTO PRINCIPAL PARA CADA FACTOR DEL PROCESO.

EFECTO DE a	0.0219
EFECTO DE b	-1.0794
EFECTO DE c	0.0044

La variabilidad en la viscosidad se ve afectada por cada uno de los efectos, se observa un valor significativo más alto para el factor "a" (velocidad de giro del rodete).

De la misma manera la interacción de "abc" para un aceite tipo automotriz es 0.01313, y la interacción de "abc" para un aceite tipo marino es -0.07975.

La desviación típica para el error experimental y la media general de los datos son respectivamente:

Aceite tipo Automotriz: $s = 0.2507,$ $x = 13.769$ cSt

Aceite tipo Marino: $s = 0.2934,$ $x = 13.873$ cSt

7.6 Análisis e Interpretación de Resultados

Se comenzara el análisis de los datos calculando y graficando las estimaciones de los efectos de los factores sobre la viscosidad cinemática del producto final.

El cuadro 7.10 y 7.11, presenta la estimación de los efectos ordenados de cada factor para representarse en papel probabilístico.

CUADRO 7.10 ALGORITMO DE YATES, PARA $k=3$ DE UN ACEITE TIPO AUTOMOTRIZ.

	b	bc	c	abc	ac	a	ab
ORDEN (i)	1	2	3	4	5	6	7
EFFECTO	-1.0795	-0.0245	0.0045	0.01313	0.02189	0.0219	0.523
(i-0.5)/7	0.07143	0.21428	0.35714	0.5	0.64286	0.78571	0.9285
z-score	-1.4633	-0.7864	-0.3629	0.0	0.3629	0.7864	1.4633

CUADRO 7.11 ALGORITMO DE YATES, PARA $k=3$ DE UN ACEITE TIPO MARINO.

	b	bc	c	abc	ac	a	ab
ORDEN (i)	1	2	3	4	5	6	7
EFFECTO	-0.1062	-0.1622	-0.0122	-0.0797	0.15775	0.31875	0.11625
(i-0.5)/7	0.07143	0.21428	0.35714	0.5	0.64286	0.78571	0.9285
z-score	-1.4633	-0.7864	-0.3629	0.0	0.3629	0.7864	1.4633

A partir del cuadro 7.10 y 7.11 se realiza la prueba de significancia de los efectos, haciendo uso de la representación gráfica de los efectos en escala probabilística como se muestra en el gráfico 7.1 y 7.2.

La variable normal para una distribución con la media de los efectos de 0.1362 y con la desviación estándar de los mismos de 0.0951, correspondiente al área de probabilidad de 95, puede calcularse aplicando la función $DISTR.NORM.INV(95, 0.1362, 0.0951)$ de Excel, siendo su valor de 0.2927, para un aceite tipo marino.

En el gráfico 7.1 y 7.3, se encontró que el único factor significativo es el Factor a. Es decir, que la variación en la medición de la viscosidad cinemática de las muestras del proceso de agitación y mezcla solo es función de la velocidad de giro del rodete. Si la prueba de idoneidad lo justifica, sería

conveniente proceder a determinar el valor optimo de giro del rodete, aplicado para la elaboración de un aceite tipo Marino.

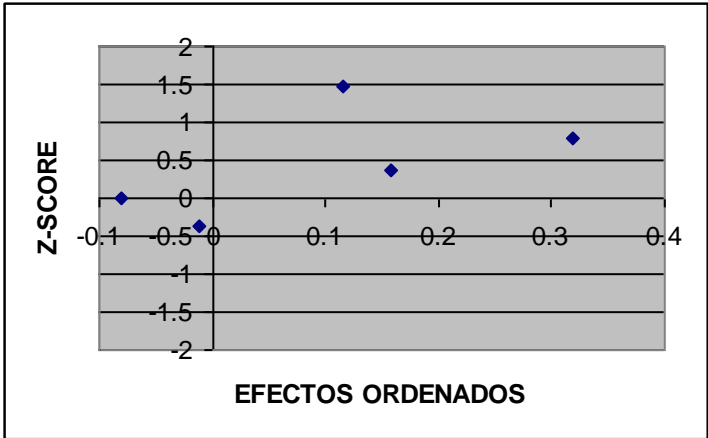


FIGURA 7.1: GRAFICO DE LOS EFECTOS ORDENADOS PARA UN ACEITE TIPO MARINO.

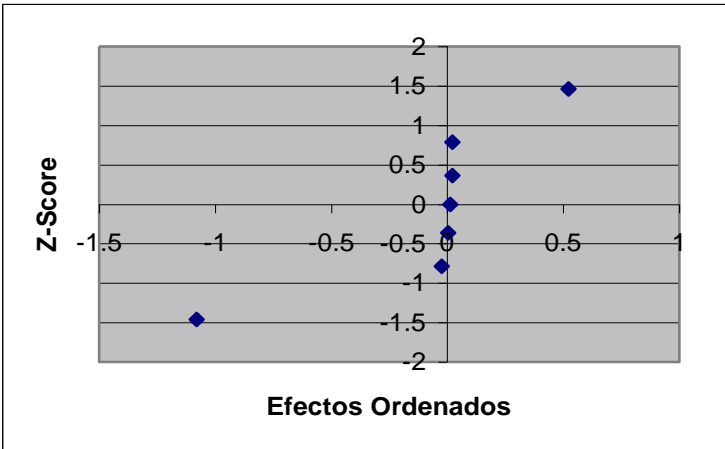


FIGURA 7.2: GRAFICO DE LOS EFECTOS ORDENADOS PARA UN ACEITE TIPO AUTOMOTRIZ.

La variable normal para una distribución con la media de los efectos de 0.2412 y con la desviación estándar de los mismos de 0.4150, correspondiente al área de probabilidad de 95, puede calcularse aplicando la función

DISTR.NORM.INV(95, 0.2412, 0.4150) de Excel, siendo su valor de 0.9238, para un aceite tipo automotriz.

En el gráfico 7.2 y 7.4, se encontró que el factor significativo es el Factor b. Es decir, que la variación en la medición de la viscosidad cinemática de las muestras del proceso de agitación y mezcla son función del tiempo de mezclado, para la elaboración de un aceite tipo Automotriz.

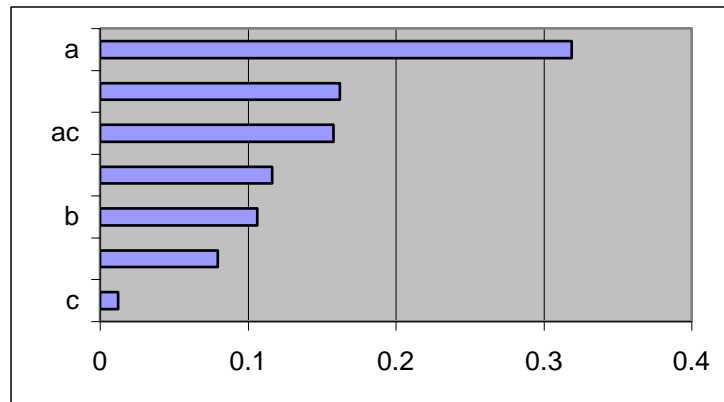


FIGURA 7.3: GRAFICO DE PARETO DE EFECTOS PARA UN ACEITE TIPO MARINO

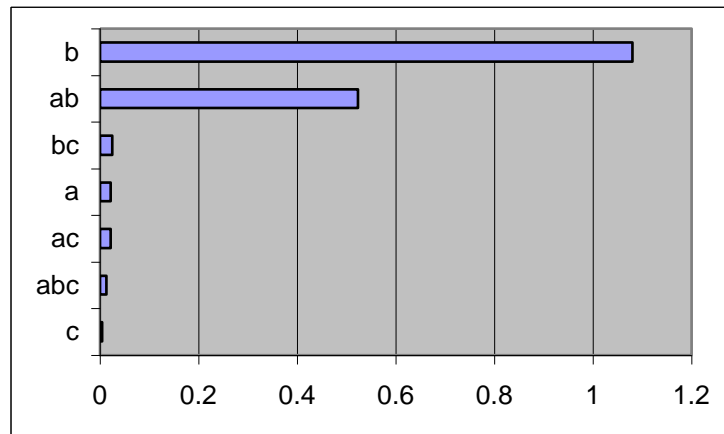


FIGURA 7.4: GRAFICO DE PARETO DE EFECTOS PARA UN ACEITE TIPO AUTOMOTRIZ

7.6.1 Prueba de Idoneidad para el experimento

Por medio de la prueba de idoneidad del modelo 2^k seleccionado, se realiza el análisis para el diseño del experimento realizado a ambos productos. Los valores obtenidos son:

Para calcular los residuos $\varepsilon_{ij} = Y_{ijk} - \hat{Y}_{ijk}$, primero se calculara el valor estimado (\hat{Y}_{ijk}) usando para este caso un modelo de regresión ajustado, de la forma:

$$\hat{Y}_{ijk} = \bar{Y} + \frac{g(A)}{2}X_1 + \frac{g(B)}{2}X_2 + \frac{g(AB)}{2}X_1X_2 + \dots +$$

Para cada efecto significativo, donde X_1 y X_2 son los valores codificados (-1), (+1), que corresponden al nivel bajo y alto de cada factor. Por lo que para el diseño del experimento para el aceite tipo automotriz, el modelo es el siguiente:

$$\hat{Y}_{ijk} = \bar{Y} + \frac{g(B)}{2}X_2 = 13.769 - 0.539X_2$$

El valor predicho para ambos factores a nivel alto, es por ejemplo:

$$\hat{Y}_{ijk} = 13.769 - 0.539(1) = 13.230$$

Por lo que, de la misma forma para el diseño del experimento para el aceite tipo marino, el modelo es el siguiente:

$$\hat{Y}_{ijk} = \bar{Y} + \frac{g(A)}{2}X_1 = 13.873 + 0.159X_1$$

El valor predicho para ambos factores a nivel bajo, es por ejemplo:

$$\hat{Y}_{ijk} = 13.873 + 0.159(-1) = 13.714$$

El cálculo de los residuos se presenta en las tablas 7.12 y 7.13, para cada uno de los aceites del experimento.

CUADRO 7.12 CALCULO DE RESIDUOS PARA UN ACEITE TIPO AUTOMOTRIZ

EXPERIMENTO	Y_{ijk}	\hat{Y}_{ijk}	$\varepsilon_{ij} = Y_{ijk} - \hat{Y}_{ijk}$
(1)	14.55	13.23	1.32
A	14.04	14.308	-0.268
B	12.985	13.23	-0.245
AB	13.495	14.308	-0.813
C	14.57	13.23	1.34
AC	14.078	14.308	-0.23
BC	12.93	13.23	-0.30
ABC	13.51	14.308	-0.798

CUADRO 7.13 CALCULO DE RESIDUOS PARA UN ACEITE TIPO MARINO

EXPERIMENTO	Y_{ijk}	\hat{Y}_{ijk}	$\varepsilon_{ij} = Y_{ijk} - \hat{Y}_{ijk}$
(1)	13.745	13.714	0.031
A	14.258	14.032	0.226
B	13.513	13.714	-0.201
AB	13.953	14.032	-0.079
C	13.673	13.714	-0.041
AC	14.03	14.032	-0.002
BC	13.925	13.714	0.211
ABC	13.89	14.032	-0.142

La prueba de homogeneidad de la varianza viene dada por el gráfico de residuos versus los valores predichos (ver figura 7.5 y 7.6).

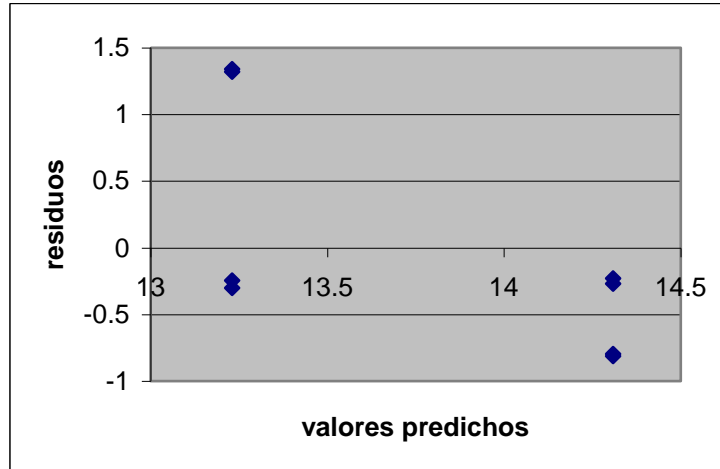


FIGURA 7.5 GRAFICO DE RESIDUOS VERSUS VALORES PREDICHOS, PARA UN ACEITE AUTOMOTRIZ.

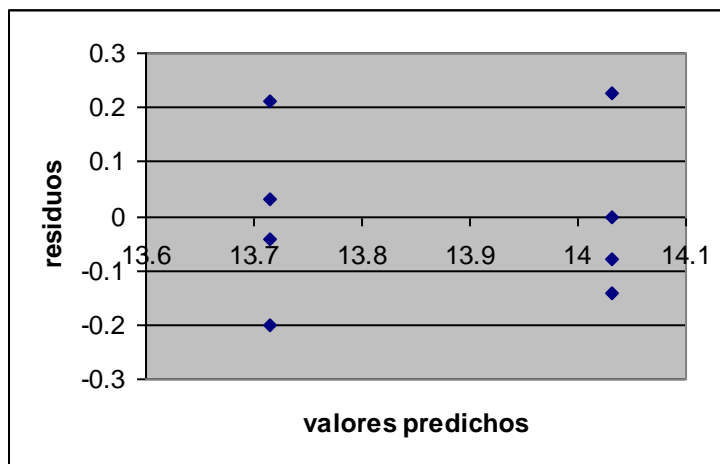


FIGURA 7.5 GRAFICO DE RESIDUOS VERSUS VALORES PREDICHOS, PARA UN ACEITE MARINO.

Como puede observarse no existe ninguna tendencia que evidencie la falta de homogeneidad de la varianza en las figuras 7.4 y 7.5

El análisis de significancia de los parámetros del modelo se presenta en el cuadro 7.14 y el análisis de varianza del modelo para el aceite automotriz se presenta en el cuadro 7.15.

A través del gráfico 7.2 de efectos, se observa que los puntos que no se ajustan a una misma tendencia son los valores significativos para el proceso, y del mismo nivel de significancia de la tabla 7.14, se observó que la variable temperatura del proceso (c), no es significativa y que debe eliminarse del modelo.

CUADRO 7.14 ANÁLISIS DE SIGNIFICANCIA DE LOS PARÁMETROS DEL MODELO PARA UN ACEITE TIPO AUTOMOTRIZ.

VARIABLE DEPENDIENTE: Viscosidad Cinemática				
Parámetro	Estimación	Error estándar	Estadístico T	Nivel de significancia
Constante	16.3933	2.58006	6.35384	0.0031
a	0.000055	0.000655243	0.0839379	0.9371
B	-0.0359833	0.00873661	-4.11868	0.0146
c	0.0005	0.029122	0.0171691	0.9841

CUADRO 7.15 ANÁLISIS DE VARIANZA DEL MODELO PARA UN ACEITE TIPO AUTOMOTRIZ.

Superficie	Suma de Cuadrados	Grados de Libertad	Media de Cuadrados	F-ratio	Nivel de Significancia
MODELO	2.33165	3	0.777216	5.66	0.0637
RESIDUOS	0.549564	4	0.137391		
TOTAL (CORR.)	2.88121	7			

R-cuadrado = 80.9259 %

R-cuadrado (ajustado) = 66.6204 %

Estimación del error estándar = 0.370663

Media del error absoluto = 0.2615

Estadística de Durbin - Watson = 2.00381

El análisis de significancia de los parámetros del modelo se presenta en el cuadro 7.16 y el análisis de varianza del modelo para un aceite tipo marino, se presenta en el cuadro 7.17.

A través de la figura 7.1 de los efectos, se observa que los puntos que no se ajustan a una misma tendencia son los valores significativos para el proceso, y del nivel de significancia de la tabla 7.16, se observó que la variable temperatura del proceso (c), no es significativa y que debe eliminarse del modelo.

CUADRO 7.16 ANÁLISIS DE SIGNIFICANCIA DE LOS PARÁMETROS DEL MODELO PARA UN ACEITE TIPO MARINO.

VARIABLE DEPENDIENTE: Viscosidad Cinemática				
Parámetro	Estimación	Error estándar	Estadístico T	Nivel de significancia
Constante	13.5459	1.31226	10.3225	0.0005
A	0.00079687	0.00033327	2.39108	0.0751
B	-0.0035416	0.0044436	-0.797026	0.4701
c	0.00136111	0.014812	0.0918924	0.9312

CUADRO 7.17 ANÁLISIS DE VARIANZA DEL MODELO PARA UN ACEITE TIPO MARINO.

Superficie	Suma de Cuadrados	Grados de Libertad	Media de Cuadrados	F-ratio	Nivel de Significancia
MODELO	0.226081	3	0.0753605	2.12	0.002404
RESIDUOS	0.142169	4	0.0355421		
TOTAL (CORR.)	0.36825	7			

R-cuadrado = 61.3935 %

R-cuadrado (ajustado) = 32.4386 %

Estimación del error estándar = 0.188526

Media del error absoluto = 0.109062

Estadística de Durbin - Watson = 2.74461

Se esperaba que el comportamiento de cada tanque fuera el mismo para cada producto, pero al igual que el diagnóstico, los cambios en viscosidad difieren de un tanque a otro en un mismo producto. Así como se muestra en la figura 6.8, los valores fuera de especificación no presentan una tendencia similar.

Se podría pensar que básicamente las diferencias en viscosidad se deben a las variaciones en la estructura y diseño de cada uno de los tanques.

Si se analizan las ecuaciones para el modelo, de viscosidad, el efecto que en ambos casos se encuentra que se ve afectado por el mismo factor es la velocidad de giro del rodete y el tiempo total de mezclado.

A partir de los gráficos de probabilidad normal se puede concluir que:

- a) Para el aceite tipo Automotriz, el factor significativo es el tiempo total de mezcla y la interacción de la velocidad de giro del rodete respecto al tiempo de mezcla.

- b) Para un aceite tipo Marino, el factor significativo es la velocidad de giro del rodete, y la interacción entre el tiempo de mezcla y la temperatura del proceso.
- Como se recordará a partir del diagnóstico se determinó que el tiempo de mezclado es un factor importante, en la elaboración de fluidos no-newtonianos, con aplicación automotriz. El caso del aceite marino es diferente, porque a partir del diagnóstico se terminaron factores externos como la homogeneidad de la materia prima, las condiciones atmosféricas que influyen en la calidad final del producto.
 - En general, se dice y para estudios posteriores que se debe monitorear diferentes velocidades de giro de rodete en cada tanque, y su relación con la variable viscosidad cinemática.
 - Por la complejidad de la investigación, y porque esta fuera de los objetivos del análisis, pero se deben verificar los resultados con los obtenidos en el proceso real de mezclado. Y monitorear todas las variables que influyen en la calidad total, las medibles y las que son fácilmente rastreables.
 - Reducir el tamaño de lotes a monitorear y enfocarse en el mismo ciclo de producción, considerando las propiedades de cada una de las constituyentes. Y factores como el día y el clima que afecten la variable respuesta.
 - Se deben construir gráficos de control, que permitan identificar las posibles variables que produzcan retrabajos, y por tanto desperdicios en procesos de elaboración de fluidos no newtonianos.

CONCLUSIONES

Se debe llevar un control para las velocidades de giro del rodete, para determinar el óptimo para cada aceite. Ya que el valor obtenido hasta el momento es fijo.

Para el aceite tipo automotriz, según el diseño de experimentos el tiempo total de mezcla se debe aumentar de 60 a 90 minutos, de la interacción entre la velocidad de giro y el tiempo de mezcla se debe trabajar con 800 rpm, ya que a mayor velocidad se necesitara menor tiempo de mezclado optimizando con esto el proceso.

Para el aceite tipo marino, según el diseño de experimentos la velocidad de giro se debe aumentar del valor real en tanque a un margen superior, para lograr un menor tiempo una mejor homogenización.

También para el aceite marino se debe monitorear la temperatura del proceso de mezclado con respecto al tiempo de mezcla.

Como puede observarse el factor mas importante para ambos productos es el tiempo total de mezcla y su relación con la velocidad y diseño del rodete, por lo que se estudiara la interacción con los demás factores para cada caso.

A partir del diagnóstico, se determino que las características químicas del aceite pueden influir en la mezcla y homogenización de las moléculas de cada aceite, produciendo un factor diferente a los del objetivo de estudio.

El volumen total de la mezcla debe ser un valor controlado y relacionado con diferentes factores como la velocidad de giro y el tiempo de mezcla y no considerarse independiente de los factores.

El diseño general de cada tanque es otro de los factores no considerados en el estudio, pero que pueden ser considerados para otro tipo de estudio.

El análisis estadístico fue de gran utilidad, debido a que se realizo en varias etapas que contribuyeron a la obtención de diferentes parámetros importantes, para la obtención de resultados adecuados al proceso.

RECOMENDACIONES

- 1) Para futuras investigaciones y mejoras en el proceso se debe llevar control de la velocidad de giro por producto y tanque en diferentes lotes del proceso.
- 2) Se debe considerar el volumen de mezcla y cada uno de los factores de estudio para conocer la relación entre cada una de las variables.
- 3) Se debe conocer la composición de cada mezcla y la interacción de cada elemento de la misma en el producto final y su relación con cada factor de los analizados en el estudio.

REFERENCIAS

1. Barnes, H.A Hutton JF & Walters K., (1989) "An Introduction to Rheology". Primera edición. Editorial Elsevier Science, Amsterdam.
2. Chevron, (2000), "Bases Lubricantes", Consulta Internet, <http://www.chevronlubricantes.com>
3. Castro Mejía-Hernández Lara-Paredes Flores (1999), Diagnóstico del problema de la contaminación y de alternativas de recuperación y uso de aceites residuales de automotores en el área metropolitana de San Salvador, Trabajo de Graduación para optar al título de Ingeniero Químico, 1999.
4. ECOPETROL (2000), Consulta Internet, <http://www.ecopetrol.com>
5. El Salvador-Estadística de Comercio Exterior. Ministerio de Economía. (2002), Consulta Internet, <http://www.centrex.com>
6. Everett D.H, (1988) "Basic Principles of Colloid Science". Capítulo 8, Royal Society of Chemistry, Inglaterra.
7. Gálvez (2001) "Conceptos básicos y Aplicaciones Industriales" (Reología) Consulta Internet, <http://www.fluidos.eia.edu.co/hidraulica/articulos/conceptosbasicosmfluidos/reologia/reologia.html>
8. Juran, J.M.; Gryna, F. (1997) "Manual de Control de Calidad". 4ª edición, editorial McGraw Hill, España.
9. Kenett, Ron s. - Zacks (2000) "Estadística industrial moderna (Diseño y control de la Calidad y la Confiabilidad)". Internacional Thomson Editores, México.
10. Kume, Hitoshi (1997) "Herramientas Estadísticas Básicas para el Mejoramiento de la Calidad". Séptima reimpresión. Grupo Editorial Norma. Barcelona
11. Lubricación (1971) "Lubricación en la Capa Limite". Volumen 57, numero 1., Editado en Texaco Inc.

12. Prat Bartés, Albert; Llabres, X; Grima Cintos, P; Pozuela Fernández, L (1999) "Métodos Estadísticos, control y mejora de la Calidad". Alfaomega Grupo Editorial, S.A. de C.V. México, D.F.
13. Patton T.C, (1979) "Paint Flow & Pigment Dispersion". Primera edición. New York.
14. Pierce, P.C (1982) "Rheological Measurements". Volumen 20, editorial John Wiley & Sons, New York.
15. Reología (2000) "Tipos de flujo". Consulta Internet, http://www.geocities.com/geo_info/carfund.htm.
16. Reología (2000) "Modelos Reologicos". Consulta Internet, <http://www.geocities.com/engr.wisc.edu/spanish.htm>.
17. Roper J.A, Attal J.F. and De Notta H. (1993) "Evaluation of Coatings using Viscoelastic Properties". Editorial Tappi Journal
18. Shell Company, (2000), "Lubricantes, combustibles, petróleo y derivados". Consulta Internet, <http://www.shellespaña.com>
19. Shell Briefing Service, (2001) "El Negocio de los Lubricantes". Grupo Royal Dutch/Shell.
20. Streeter-Wylie, (1989) "Mecánica de Fluidos". Sexta edición, Mc Graw-Hill, México.
21. Tanner R.I. (1988) "Engineering Rheology". Editorials Oxford Science, New York.

ANEXOS

ANEXO A. PROCESOS DE MEJORA Y SU APLICACIÓN ESTADÍSTICA A PROCESOS DE AGITACION Y MEZCLA

Las empresas son sistemas diseñados para servir a los consumidores o clientes. Los procesos y actividades están conectadas y se afectan mutuamente. Una empresa debe mejorar constantemente estos sistemas y sus procesos de trabajo, de manera que el producto final sobrepase las expectativas del cliente.

Por lo anterior, se debe definir lo que es un proceso. Un proceso es un conjunto de operaciones conectadas por un flujo de materiales e información que combina y transforma insumos en productos de mayor valor agregado. Es una agrupación de acciones dirigidas a conseguir un resultado.

Así, cada proceso se describe cuidadosamente, los problemas se identifican, la causa de los problemas se determinan a través de una investigación cuidadosa. Nuevos sistemas a prueba de errores se desarrollan. Cada proceso está bajo control para ir efectuando las correcciones y disminución de errores. Y así, con cada mejora los procesos funcionan mejor. La productividad aumenta, y los desperdicios disminuyen.

Una continua disminución de los errores, un continuo mejoramiento de la calidad, significa costos cada vez más bajos. Menos reproceso en la fabricación. Menos desperdicio de materiales, de tiempo de equipos, de herramientas, de esfuerzo humano. A medida que los costos disminuyen debido a una disminución en el volumen de trabajos repetidos, se tendrá menos errores, menos desperdicio, aumentando por tanto, la productividad.

Por eso, es importante elaborar un plan de mejoramiento, que identifique las necesidades y preocupaciones de cada cliente. Las actividades siguientes, permiten una identificación de cada uno de los componentes a mejorar en un proceso.

1. Mantener la comunicación entre los miembros del equipo de mejora,
2. Arreglar los problemas obvios
3. Buscar las causas, y encontrar manera de prevenirlas.

4. Documentar el proceso y los problemas.
5. Vigilar constantemente los cambios.

Un plan de mejoramiento continuo debe contar con etapas que permitan realizar avances en las estrategias de mejoramiento de la calidad. Estas etapas se mencionan a continuación:

- a) Etapa 1: Entender el proceso. Esta etapa debe contar con una descripción del proceso, identificación de las necesidades y preocupaciones del cliente.
- b) Etapa 2: Eliminar los errores. Se debe elaborar un proceso a prueba de errores.
- c) Etapa 3: Suprimir lo innecesario. Hacer procesos más eficientes.
- d) Etapa 4: Reducir la variación. Es decir, se debe reducir la variación de los sistemas de medición, Llevar el proceso de medición a un estado de control estadístico, como es el caso de este estudio.
- e) Etapa 5: Plan para el mejoramiento continuo. Un plan, cuenta con los siguientes aspectos, planificar, ejecutar, verificar y actuar.

La etapa cuatro es la que mas se acerca al tipo de estudio necesario para la elaboración de nuestro plan. En la etapa cuatro se trataran de reducir la variación. Las fuentes de variación se dividen en dos clases: las causas comunes y las causas especiales. Las causas comunes provienen habitualmente de numerosas fuentes, siempre presentes y de poca variación. En cambio las causas especiales, no están siempre presentes y usualmente causan fluctuaciones mayores en el proceso.

Las estrategias recomendadas para reducir la variación son:

1. Usar estrategias para reducir fuentes de variación en los sistemas de medición.
2. Llevar estrategias donde se permitan, tener una revisión de los procesos llevándolos a un estado de control estadístico en sus sistemas de medición. Medir rápidamente un objeto ayudará a identificar y a eliminar las causas especiales de variación en sus procesos de medición.
3. Reducir las fuentes de variación.
4. Llevar un proceso a un estado de control estadístico.

5. La estrategia de llevar un proceso a un estado de control estadístico, requiere de una planificación del gráfico, comenzar el gráfico, eliminar las causas, planificar un mejoramiento continuo, y evaluar la utilidad de las variables involucradas en el proceso de producción.

Se pueden eliminar muchas fuentes evidentes de variación usando las herramientas de estratificación. De esta manera que el proceso se debe llevar a un proceso de control estadístico. Cuando un proceso está bajo control estadístico, su actuación es más predecible y tiene un buen punto de partida para hacer mejoras más importantes.

Este tipo de control estadístico, requiere la evaluación de métodos generales estadísticos, de gráficas que servirán para la interpretación de cada uno de los factores involucrados en el proceso. A la hora de realizar los análisis, las expresiones de los efectos en el diagrama deben ser concretas.

A partir de un control estadístico se realizan acciones, que permitan eliminar las principales causas de error en los procesos. Un hecho importante en la selección de acciones es asegurarse la cooperación activa de todos los involucrados.

Basados en las mejoras que se deben realizar, el proceso de agitación y mezcla debe someterse al análisis y diagnóstico de cada una de las etapas del proceso, por tal motivo se hará un planteamiento del proceso de producción, en el cual se analicen diferentes factores que son piezas determinantes en el comportamiento del producto final. Factores que afectan las variables de calidad del proceso y que permitirán conocer e identificar las posibles causas de retrabajos, así como de las soluciones de mejora. Por medio del plan de investigación se evaluarán cada una de las características de calidad.

ANEXO B. TEORIA GENERAL ESTADISTICA

EL MUESTREO Y EL PROBLEMA DE ESTIMAR

El proceso mediante el cual se recoge el conjunto de observaciones que constituyen una muestra se denomina Muestreo y el número de elementos que componen la muestra se denomina Tamaño Muestral. Existen dos procesos de obtención de muestras probabilísticas: a) las técnicas de muestreo, cuando los elementos de la población ya existen, b) el diseño de experimentos, cuando se crean los elementos mediante un experimento o ensayo.

Para el muestreo se necesita describir estrategias de muestreo probabilística. Una es realizar el muestreo en forma aleatoria, con o sin reemplazo, de la población total, a lo que se le llama *muestreo aleatorio simple*, donde se extrae una muestra al azar usando una tabla de números aleatorios. La otra estrategia se le llama *muestreo aleatorio estratificado*. En el muestreo aleatorio estratificado se divide primero la población en estratos (subpoblaciones), y a continuación se toma una muestra aleatoria simple de cada estrato, en forma independiente. Si se determinan los estratos de modo que la variabilidad en ellos sea menor en comparación con la variabilidad general en la población, se obtendrá una mayor precisión para estimar el promedio de la población (KENETT-ZACKS, 2000).

La estratificación es una estrategia de clasificación de los datos de acuerdo a una variable o factor de interés, de tal forma que en una situación dada se facilite la identificación de las fuentes de variabilidad.

Población y Muestras

Una muestra es uno o más ítems tomados de una población para proporcionar información sobre la población.

La muestra se usa para estimar las características de la población, por lo que se debe seleccionar de tal forma que refleje las características de ésta. Un método común para la selección de muestras es seleccionar cualquier miembro de la población con igual probabilidad. Este método se llama *muestreo aleatorio*, y una muestra seleccionada por medio del muestreo aleatorio se denomina muestra aleatoria (TORRES, 2001).

Histogramas

El histograma es un método que nos permite de una forma fácil y rápida comprender una población. La organización de un buen número de datos en un histograma nos permite comprender la población de manera objetiva.

Estratificación de Histogramas

Cuando los valores observados se dividen en dos o más subpoblaciones según la condición que existía en el momento de recoger los datos, esas subpoblaciones se llaman estratos, y la división de los datos en estratos se llama estratificación.

Los valores observados siempre van acompañados de alguna variación. Por tanto, cuando los datos se estratifican según los factores que se cree pueden causar la variación, las causas de la variación se hacen más fácilmente detectables. Este método puede usarse efectivamente para mejorar la calidad del producto al reducir la variación y mejorar el promedio del producto.

Medidas para representar las características de las distribuciones

El valor de las características medidas a una muestra tomada de una población variará, y no puede conocerse hasta que se observa.

Para conocer las características, es necesario considerar a los datos como un conjunto en lugar de tratarlos individualmente, por lo que se debe determinar primero cual es el centro de los datos, y cómo cada dato de la información se concentra alrededor del centro.

Una medida para expresar el centro es la media o expectativa. Cuando hemos obtenido n datos, x_1, \dots, x_n , la media de estos datos está dada por

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i , \quad \text{Ecc. B.1}$$

y para todo el conjunto, la media está dada por

$$\mu = \sum xP(x), \quad \text{Ecc. B.2}$$

O

$$\mu = \int xf(x)dx, \quad \text{Ecc. B.3}$$

donde $P(x)$ es la probabilidad y $f(x)$ es la densidad probable de la variable aleatoria x .

\bar{x} es la media de los datos corregidos, y se llama media de la muestra. μ es la media de la totalidad del conjunto, y se llama media de la población.

La varianza y la desviación estándar están entre las medias que se usan para expresar el grado de concentración de los datos alrededor del centro. Cuando hemos obtenido n datos, x_1, \dots, x_n , la varianza de estos datos se expresa por

$$V = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2, \quad \text{Ecc. B4}$$

Y la desviación estándar se expresa por

$$s = \sqrt{V} \quad \text{Ecc. B.5}$$

La varianza de una población está dada por

$$\sigma^2 = \sum (x - \mu)^2 P(x) \quad \text{Ecc. B.6}$$

O

$$\sigma^2 = \int (x - \mu)^2 f(x)dx \quad \text{Ecc. B.7}$$

y la desviación estándar, que es la raíz cuadrada de la varianza, se expresa como σ .

La varianza es la media del cuadrado de las diferencias entre el dato individual y la media. Una varianza grande significa que hay gran variación en los datos.

V y s son los valores relacionados con los datos, y se llaman varianza de la muestra y desviación estándar de la muestra, respectivamente. σ^2 y σ son valores relacionados con una población y se llaman varianza de la población y desviación estándar de la población, respectivamente.

La media y la varianza son variables aleatorias, que cambian el valor de una muestra a la siguiente. Además estos estimadores son no sesgados si su valor esperado es igual al valor de población de la cantidad que estime. La precisión de un estimador es la inversa de su varianza de muestra.

La distribución normal y sus características

a. La distribución normal

Existen muchas clases de distribución, y la más típica es la distribución normal. Cuando la variación de una característica de calidad es causada por la suma de un gran número de errores infinitesimales independientes debidos a diferentes factores, la distribución de la característica de calidad se aproxima a una distribución normal. La forma de la distribución normal puede describirse detalladamente como,

- b. La frecuencia es mayor en el centro y disminuye gradualmente hacia los extremos y,
- b. Es simétrica.

Esta curva puede expresarse matemáticamente como:

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad \text{Ecc. B.8}$$

b. características de la distribución normal

La distribución normal se determina por dos parámetros μ y σ^2 , y se designa por $N(\mu, \sigma^2)$. Estos parámetros tienen el siguiente significado:

μ : el centro de la distribución (la media)

σ^2 : la dispersión de la distribución (la desviación estándar)

Para calcular una probabilidad en una distribución normal, estandarizamos y usamos la tabla de la distribución normal. Estandarizar es transformar una variable x a:

$$u = \frac{x - \mu}{\sigma} \quad \text{Ecc. B.9}$$

Tenemos la media estándar u , la cual se distribuye como la distribución estándar normal $N(0,1^2)$. La tabla de la distribución normal da las probabilidades en la distribución estándar normal.

Índice de capacidad del proceso

Con frecuencia, después de que el histograma muestra que sigue una distribución normal, se inicia un estudio de la capacidad del proceso. Esto se hace para saber si el proceso puede o no cumplir las especificaciones. Si suponemos que el proceso está distribuido normalmente, podemos determinar el porcentaje de productos defectuosos a partir de las especificaciones dadas y de los parámetros (μ, σ) , pero es más útil evaluar el proceso usando C_p (Índice de capacidad del proceso). La definición del C_p es la siguiente:

Especificaciones bilaterales (LE_s y LE_i)

$$C_p = \frac{LE_s - LE_i}{6s} \quad \text{Ecc. B.10}$$

Especificaciones unilaterales (LE_s y LE_i)

$$C_p = \frac{LE_s - \bar{x}}{3s} \quad \text{Ecc. B.11}$$

O

$$C_p = \frac{\bar{x} - LE_i}{3s} \quad \text{Ecc. B.12}$$

Y la evaluación del proceso usando C_p es como sigue:

- 1) $1.33 \leq C_p$ Satisfactorio
- 2) $1.00 \leq C_p < 1.33$ Adecuado

3) Cp < 1.00 Inadecuado

Diseño Factorial en la evaluación de procesos de agitación y mezcla

La ocurrencia de algún hecho diferente de lo habitual, y la circunstancia de que este hecho se produzca en presencia de una persona capaz de identificarlo como extraño, reflexionar sobre él y, lo que resulta más difícil, extraer consecuencias y conclusiones. Por lo que la experimentación consiste en reproducir artificialmente estas dos circunstancias.

Los datos recogidos para la experimentación deben ser consistentes, el rango de las variables debe estar dentro de un límite de control, las variables tomadas no deben producir datos correlacionados cuidando que las variables no produzcan confusión de efectos y que no existan variables ocultas.

Es por eso que se variaran las condiciones habituales de trabajo, para encontrar y resolver el problema de la evaluación de parámetros de operación en procesos de agitación y mezcla, y partiendo del hecho que la elaboración de aceites lubricantes de tipo automotriz y de motor estacionario.

Para el diseño factorial fijaremos variables a niveles adecuados, y que nos proporcionen productos que cumplan con los rangos de manufactura.

Con la necesidad de realizar diseños factoriales, se dirá a continuación los conceptos más importantes en el diseño factorial:

Respuesta: es el nombre genérico que se le da a la característica estudiada.

Factores: se designa de esta forma a las variables que se considera que puedan afectar a la respuesta y, por tanto, se incluyen en el plan de experimentación.

Niveles: Son los valores que toma un factor en un determinado experimento.

Papel probabilística normal

Este método se basa en representar los efectos en papel probabilística normal. Al representar en él los datos provenientes de una ley normal, los puntos aparecerán aproximadamente alineados.

Para representar en papel probabilística normal, basta con:

- Ordenar los valores (en este caso los efectos excluyendo la media) de menor a mayor,
- Calcular la proporción de efectos menores que el que se está considerando. Éste será el valor de la ordenada. Para ello se puede utilizar la fórmula:

$$P = 100(i-0.5)/n$$

Donde:

i es el número de orden de cada efecto

n numero total de efectos

- Representar las parejas (efecto, P)

ANEXO C
TABLAS DE DATOS OBTENIDOS DEL PROCESO

CUADRO C.1 TABLA DE DATOS RECOLECTADOS TANQUE A, DEL PROCESO PARA EL DIAGNOSTICO

Numero	Lote	Viscosidad Cinemática	Tiempo	Numero	Lote	Viscosidad Cinemática	Tiempo	Numero	Lote	Viscosidad Cinemática	Tiempo
		(cSt)	(min)			(cSt)	(min)			(cSt)	(min)
1	805	14.6	60	19	561	14.56	60	37	682	13.75	60
2	810	14.77	52	20	562	14.26	95	38	683	13.78	60
3	814	14.75	73	21	563	14.65	105	39	685	13.69	85
4	817	14.69	60	22	564	14	60	40	710	14	85
5	828	14.3	95	23	569	14.78	75	41	712	14.03	75
6	427	13.73	105	24	570	14.8	60	42	713	14.1	60
7	437	14	65	25	574	14.6	60	43	720	13.59	60
8	444	13.65	60	26	575	14	75	44	725	13.75	75
9	468	14.4	95	27	577	14	60	45	731	13.64	70
10	524	14	60	28	578	14.85	60	46	733	13.89	90
11	530	14.77	60	29	579	14.77	60	47	736	14	60
12	532	14.56	65	30	581	14.75	60	48	738	14.1	60
13	540	14.8	60	31	582	13.45	75	49	744	14.2	60
14	543	14.69	60	32	586	14.56	60	50	749	14	60
15	544	14.25	60	33	587	14.6	75	51	750	13.75	60
16	552	13.98	65	34	589	14	60	52	759	13.8	75
17	554	13.78	75	35	590	13.5	95	53	760	14	60
18	560	14.08	75	36	680	13.66	60				

CUADRO C.2 TABLA DE DATOS RECOLECTADOS TANQUE B, DEL PROCESO PARA EL DIAGNOSTICO

Numero	Lote	Viscosidad Cinemática	Tiempo	Numero	Lote	Viscosidad Cinemática	Tiempo	Numero	Lote	Viscosidad Cinemática	Tiempo
		(cSt)	(min)			(cSt)	(min)			(cSt)	(min)
1	816	14.06	60	22	571	14	80	43	615	14.05	60
2	826	13.95	60	23	573	14	75	44	617	13.96	60
3	832	14.06	60	24	580	14.25	60	45	618	14	60
4	848	14.16	60	25	583	13	60	46	620	13.75	110
5	852	14.17	60	26	584	14.12	75	47	621	14	90
6	859	14.06	60	27	547	14.02	60	48	622	14.05	90
7	867	14.22	60	28	549	14	60	49	633	14.01	90
8	873	14.26	60	29	550	14.05	90	50	634	13.95	95
9	881	14.43	195	30	555	14.3	110	51	636	13.75	85
10	405	13.99	50	31	558	14.25	90	52	658	14	60
11	420	14.28	75	32	565	13.96	75	53	660	14.06	60
12	429	14.02	90	33	585	13.85	60	54	668	14.1	60
13	438	14.07	58	34	591	14.05	60	55	667	14.1	60
14	440	13.99	75	35	592	14.17	60	56	672	14	60
15	456	13.96	60	36	593	14.58	60	57	674	14.25	60
16	459	13.96	60	37	605	14	75	58	688	14.15	60
17	469	14.09	60	38	603	14	75	59	681	13.45	110
18	476	13.9	80	39	602	14.02	85	60	687	13.66	60
19	485	14.41	105	40	606	14.3	60	61	689	13.75	60
20	494	14.02	60	41	604	14.2	90				
21	568	13.48	60	42	608	14.15	110				

CUADRO C.3 TABLA DE DADOS RECOLECTADOS TANQUE C, DEL PROCESO PARA EL DIAGNOSTICO

Numero	Lote	Viscosidad Cinemática	Tiempo	Numero	Lote	Viscosidad Cinemática	Tiempo	Numero	Lote	Viscosidad Cinemática	Tiempo
		(cSt)	(min)			(cSt)	(min)			(cSt)	(min)
1	803	14.14	70	24	572	14.76	85	47	645	13.85	85
2	820	14.06	60	25	576	13.85	60	48	647	13.75	85
3	847	14.26	90	26	594	13.96	60	49	649	13.56	75
4	858	15	60	27	596	13.85	60	50	650	13.96	60
5	878	14.34	60	28	598	13.75	85	51	651	13.9	60
6	885	13.96	60	29	601	13.75	85	52	652	13.8	60
7	892	14.2	60	30	607	13.85	75	53	653	14	60
8	893	14.16	80	31	609	13.84	60	54	657	14	60
9	406	13.67	85	32	610	13.89	60	55	659	14.05	75
10	408	13.91	60	33	611	13.96	60	56	654	14.1	80
11	421	14.05	90	34	613	14	70	57	656	14	75
12	428	14.19	60	35	612	14.1	60	58	665	14.1	75
13	431	13.81	45	36	614	13.36	110	59	663	14	80
14	441	13.6	85	37	616	14	90	60	670	14.1	85
15	473	13.93	60	38	623	14.1	90	61	673	13.9	80
16	484	13.96	80	39	625	14.25	85	62	675	13.85	80
17	500	13.76	65	40	627	13.93	60	63	677	13.85	60
18	541	13.84	60	41	629	13.9	60	64	676	14	60
19	542	14	60	42	630	13.92	60	65	678	14.66	90
20	546	14.01	75	43	632	14	85	66	684	14	90
21	551	13.96	75	44	638	14	70	67	686	13.75	60
22	553	13.86	70	45	642	14.01	80				
23	566	13.75	80	46	643	13.33	90				

ANEXO D
TABLAS DE CALCULOS PARA EL DIAGNOSTICO DEL PROCESO A PARTIR
DEL ANALISIS DE LOS DATOS

CUADRO D.1 DATOS DE DIAGNOSTICO PARA TANQUE A (VISCOSIDAD)

	CLASE	PM (X)	f	u	uf	u²f
1	13.45 - 13.65	13.55	5	-2	-10	20
2	13.65 - 13.85	13.75	9	-1	-9	9
3	13.85 - 14.05	13.95	13	0	0	0
4	14.05 - 14.25	14.15	5	1	5	5
5	14.25 - 14.45	14.35	3	2	6	12
6	14.45 - 14.65	14.55	7	3	21	63
7	14.65 - 14.85	14.75	11	4	44	176
TOTAL			53		57	285

CUADRO D.2 DIAGNOSTICO TANQUE A, CON RESPECTO AL TIEMPO DE MEZCLA

	CLASE	PM (X)	f	u	uf	u²f
1	52 - 57	54.5	1	-1	-1	1
2	57 - 62	59.5	29	0	0	0
3	62 - 67	64.5	3	1	3	3
4	67 - 72	69.5	1	2	2	4
5	72 - 77	74.5	10	3	30	90
6	77 - 82	79.5	-	4	-	-
7	82 - 87	84.5	2	5	10	50
8	87 - 92	89.5	1	6	6	36
9	92 - 97	94.5	4	7	28	196
10	97 - 102	99.5	-	8	-	-
11	102 - 107	104.5	2	9	18	162
TOTAL			53		96	542

CUADRO D.3 DIAGNOSTICO FORMA GENERAL PARA ACEITE DE ESPECIFICACIÓN MARINA.

	CLASE	PM (x)	f	u	uf	u²f
1	13.00 - 13.20	13.1	1	-4	-4	16
2	13.20 - 13.40	13.3	2	-3	-6	18
3	13.40 - 13.60	13.5	4	-2	-8	16
4	13.60 - 13.80	13.7	12	-1	-12	12
5	13.80 - 14.00	13.9	54	0	0	0
6	14.00 - 14.20	14.1	37	1	37	37
7	14.20 - 14.40	14.3	12	2	24	48
8	14.40 - 14.60	14.5	3	3	9	27
9	14.60 - 14.80	14.7	2	4	8	32
10	14.80 - 15.00	14.9	1	5	5	25
TOTAL			128		53	231

CUADRO D.4 DIAGNOSTICO PARA TANQUE B. (VISCOSIDAD)

	CLASE	PM (x)	f	u	uf	u²f
1	13.00 - 13.20	13.1	1	5	5	25
2	13.20 - 13.40	13.3	-	4	-	-
3	13.40 - 13.60	13.5	2	3	6	18
4	13.60 - 13.80	13.7	4	2	8	16
5	13.80 - 14.00	13.9	19	1	19	19
6	14.00 - 14.20	14.1	23	0	0	0
7	14.20 - 14.40	14.3	9	-1	-9	9
8	14.40 - 14.60	14.5	3	-2	-6	12
TOTAL			61		23	99

CUADRO D.5 DIAGNOSTICO PARA TANQUE B. (TIEMPO)

	CLASE	PM (x)	f	u	uf	u²f
1	50 - 70	60	36	0	0	0
2	70 - 90	80	18	1	18	18
3	90 - 110	100	6	2	12	24
4	110 - 130	120	-	3	-	-
5	130 - 150	140	-	4	-	-
6	150 - 170	160	-	5	-	-
7	170 - 190	180	-	6	-	-
8	190 - 210	200	1	7	7	49
TOTAL			61		37	91

CUADRO D.6 DIAGNOSTICO PARA TANQUE C. (VISCOSIDAD)

	CLASE	PM (x)	f	U	uf	u²f
1	13.33 - 13.53	13.43	2	3	6	18
2	13.53 - 13.73	13.63	3	2	6	12
3	13.73 - 13.93	13.83	25	1	25	25
4	13.93 - 14.13	14.03	27	0	0	0
5	14.13 - 14.33	14.23	6	-1	-6	6
6	14.33 - 14.53	14.43	1	-2	-2	4
7	14.53 - 14.73	14.63	1	-3	-3	9
8	14.73 - 14.93	14.63	1	-4	-4	16
9	14.93 - 15.13	14.83	1	-5	-5	25
TOTAL			67		17	115

CUADRO D.7 DIAGNOSTICO PARA TANQUE C. (TIEMPO)

	CLASE	PM (x)	f	U	uf	u²f
1	45 - 50	47.5	1	-2	-2	4
2	50 - 55	52.5	-	-1	-	-
3	55 - 60	57.5	28	0	0	0
4	60 - 65	62.5	1	1	1	1
5	65 - 70	67.5	4	2	8	16
6	70 - 75	72.5	7	3	21	63
7	75 - 80	77.5	8	4	32	128
8	80 - 85	82.5	10	5	50	250
9	85 - 90	87.5	7	6	42	252
10	90 - 95	92.5	-	7	-	-
11	95 - 100	97.5	-	8	-	-
12	100 - 105	97.5	-	9	-	-
13	105 - 110	102.5	1	10	10	100
TOTAL			67		152	714

A partir de las tablas de frecuencias para cada tanque se realizo la interpretación y análisis del diagnostico del proceso.