

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



“Ensayos de coordinación de aislamiento en  
elementos de circuitos de distribución utilizando el  
generador de impulso de alto voltaje”

PRESENTADO POR

VLADIMIR ALEXANDER ALVARADO CACERES

HUGO ALBERTO SOSA GUARDADO

SANTOS BENJAMIN VELASCO CASTRO

PARA OPTAR AL TITULO DE:

INGENIERO ELECTRICISTA

CIUDAD UNIVERSITARIA, ENERO 2005

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR

RECTORA :

Dra. María Isabel Rodríguez

SECRETARIA GENERAL:

Licda. Alicia Margarita Rivas de Recinos

FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA

DECANO :

Ing. Mario Roberto Nieto Lovo

SECRETARIO :

Ing. Oscar Eduardo Marroquín Hernández

DIRECTOR :

Ing. Luís Roberto Chévez Paz

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

Trabajo de Graduación previo a la opción al Grado de:

INGENIERO ELECTRICISTA

Título :

“Ensayos de coordinación de aislamiento en elementos de circuitos de distribución utilizando el generador de impulso de alto voltaje”

PRESENTADO POR:

VLADIMIR ALEXANDER ALVARADO CACERES

HUGO ALBERTO SOSA GUARDADO

SANTOS BENJAMIN VELASCO CASTRO

Trabajo de Graduación aprobado por:

Docente Director :

Ing. Luís Roberto Chévez Paz

San Salvador. Enero 2005

Trabajo de Graduación aprobado por:

Docente Director :

Ing. Luís Roberto Chévez Paz

## TABLA DE CONTENIDOS

	Página
Prefacio	i
Resumen del trabajo	iii
Capítulo	
I. COORDINACION DE AISLAMIENTO EN LINEAS DE DISTRIBUCION.	
Introducción	
1.0 Definiciones y generalidades	1
1.1 Coordinación de aislamiento	1
1.1.1 Principios básicos de coordinación de aislamiento	2
1.1.2 Aislamientos	2
1.1.3 Clarificación del aislamiento	2
1.1.4 Fenómenos particulares	3
1.1.5 Fenómeno de resonancia	4
1.1.6 Fenómeno de ferroresonancia	5
1.2 Sobretensiones	6
1.2.1 Origen de las sobretensiones	7
1.2.2 Causas y efectos de las sobretensiones	9
1.2.3 Comparación de las sobretensiones	10
1.3 Normas y generalidades	11
1.3.1 La normalización en el campo eléctrico	12
1.3.2 La aislación y las normas	12
1.4 Aterrizajes y protección contra cargas estáticas o rayos	13
1.4.1 Aterrizaje de cargas estáticas	13
1.4.2 Aterrizaje para protección contra rayos	14
1.5 Sobretensiones debidas a descargas atmosféricas o rayos	14
1.5.1 Análisis estadístico	16
1.5.2 Hilos de guarda y disposición de los conductores	17
1.6 Ondas errantes	19
1.7 Nivel isoceraunico	19
1.7.1 Polaridad	19

1.7.2 Densidad de rayo	20
CONCLUSIONES DEL CAPITULO I	25
REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS	26
II. GENERADOR DE IMPULSOS DEFINICIONES DE TERMINOS DE APLICACIÓN E INSTALACIONES DE SEGURIDAD DE LABORATORIO DE LA PRUEBA DE IMPULSO	
Introducción	
2.0 Definiciones generales	28
2.1 Impulso	
2.1.2 Impulso de tensión de rayo y de conmutación	28
2.2 Características relacionadas a descargas disruptivas y voltajes de prueba	29
2.2.1 Descarga disruptiva	29
2.2.2 Voltaje de descarga Disruptiva	29
2.2.3 Probabilidad de descarga disruptiva P	29
2.2.4 Probabilidad de resistencia	29
2.2.5 Tensión o voltaje de Resistencia	30
2.2.6 Voltaje de descarga disruptiva asegurado	30
2.2.7 Voltaje de descarga disruptiva de 50 %	30
2.3 La onda de la prueba impulso	30
2.3.1 Onda de la prueba impulso de rayo(Lightning impulse)	30
2.3.2 Onda de la prueba de impulso de rayo recortado	33
2.3.3 La onda de impulsa de conmutación o de maniobra	37
2.4 Requerimientos generales a los Procedimientos y objetos de Prueba	39
2.4.1 Arreglo general del objeto de prueba	39
2.4.2 Pruebas húmedas	39

2.4.3 Pruebas secas	40
2.4.4 Procedimiento de pruebas Húmedas	40
2.5 Condiciones atmosféricas	42
2.5.1 Factores de corrección Atmosférica	42
2.5.2 Condiciones atmosféricas Estándar	43
2.5.3 Factores de corrección para la humedad y la densidad del aire	43
2.5.4 Medida de la humedad	46
2.6 Nivel Básico de Aislamiento al Impulso de rayo	47
2.7 Nivel Básico de Aislamiento al Impulso de conmutación	49
2.8 El Generador de impulsos	49
2.8.1 Principio de operación	49
2.8.2 Generador de impulsos de una sola etapa	50
2.8.3 Generador de impulsos de varias etapas	55
2.9 Requisitos generales de un generador de impulsos	56
2.10 El sistema real	57
2.11 Conexiones alternativas del generador de impulsos	58
2.12 Eficiencia del generador	59
2.13 La energía del generador	61
2.14 Generación de impulsos de conmutación utilizando transformadores de prueba de alto voltaje	62
2.14.1 Introducción	62
2.14.2 Consideraciones teóricas	63
2.14.3 Limitaciones prácticas	63
2.15 Laboratorio de la prueba de Impulso	63
2.15.1 Introducción	63
2.15.2 Laboratorio de la prueba	

de impulso	64
2.15.3 El generador de impulsos	65
2.15.3.1 El generador de voltaje DC	65
2.15.3.2 El circuito de forma de onda	66
2.15.4 El sistema de control	67
2.15.4.1 Consola de control	67
2.15.4.2 Trigatrón	68
2.15.4.3 Sistema de control del espaciamiento de los explosores	69
2.16 El sistema de medición	69
2.16.1 Generalidades	69
2.16.2 Componentes del sistema de medida	70
2.17 El objeto bajo prueba	74
2.17.1 Aisladores	74
2.17.2 Transformadores	75
2.18 El explosor de esferas	76
2.18.1 Altura de las esferas sobre el plano horizontal de tierra	77
2.18.2 Medición del voltaje de impulso	79
2.18.3 Voltaje de descarga disruptiva de explosores de esferas	80
2.19 Seguridad e instalaciones para un laboratorio de alto voltaje	86
2.19.1 Introducción	86
2.19.2 Generalidades	86
2.19.3 Requerimientos de espacio	86
2.19.4 Salón de alto voltaje	90
2.19.5 Apantallamiento electromagnético y retorno de tierra	91
2.19.6 Seguridad en pruebas de alto voltaje	92
2.19.6.1 Protección contra riesgos Eléctricos	93
2.19.6.2 Protección contra riesgos no eléctricos	101
2.19.7 Protección de daño a los oídos	102
2.19.8 Prevención de daño a los ojos	102
CONCLUSIONES DEL CAPITULO II	103
REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS	105

III LABORATORIO DE LA PRUEBA DE  
IMPULSO EXISTENTE

Introducción

3.1 El lugar de la instalación	107
3.2 Descripción del laboratorio	110
3.3 El generador de impulsos	112
3.3.1 Generador de impulsos	114
3.3.1.1 Plataforma metálica con ruedas	114
3.3.1.2 Estructura aislante	116
3.3.1.3 Capacitores de cada etapa	117
3.3.1.4 Resistencias de forma de onda	117
3.3.1.5 Resistencias de carga	118
3.3.1.6 Espinterómetros	118
3.3.1.7 Condensador trigatrón	118
3.3.2 Generador de corriente continúa	119
3.4 Capacitor de carga/divisar tipo ILCD	120
3.5 El espinterómetro de medición	122
3.6 El banco de mando	125
3.6.1 Unidad de potencia	125
3.6.2 Unidad de servicios 94	126
3.6.2.1 Interruptor de control (CONTROL SWITCH)	126
3.6.2.2 Interruptor de aterrizaje (EARTHING SWITCH)	126
3.6.2.3 Interruptor de carga (CHARGING SMITCH)	128
3.6.2.4 Polaridad (POLARITY)	128
3.6.2.5 Apagado de emergencia (ENEPGENCY OFF)	129
3.6.2.6 alarma (ALARM)	129
3.6.2.7 Parada de la alarma (ALARM STOP)	129
3.6.2.8 Falta de aire (NO AIR)	129
3.6.2.9 Corriente de alimentación (FEEDING CURRENT)	129
3.6.2.10 Distancia entre esferas (SPHERE GAP DISTANCE)	130
3.6.2.11 Ajuste de la regulación (RES. ADJ.)	130
3.6.2.12 Conmutador auto/manual	130
3.6.2.13 Control manual (man. control)	130
3.6.3 Unidad de regulación	130

3.6.3.1	Rango de voltaje (VOLTAGE RANGE)	131
3.6.3.2	Intervalo de tiempo (TIME INTERVAL)	131
3.6.3.3	Ajuste del voltaje de carga (VOLTAGE SETTING)	131
3.6.3.4	Listo (READY)	131
3.6.3.5	Voltaje de carga (CHARGING VOLTAGE)	131
3.6.3.6	Número de disparos (SHOT NR)	132
3.6.3.7	Conmutador (SING./ MUL)	132
3.6.4	Unidad de disparo "TRIGGER" (ETR)	132
3.6.4.1	Principal (MAIN)	132
3.6.4.2	Dispara manual (MANUAL FIRING)	132
3.6.4.3	Retardo del inicio (RELÉASE DELAY)	133
3.6.4.4	Control de recorte (CHOPPING CONTROL)	133
3.6.4.5	Retardo del recorte (CHOPPING DELAY)	133
3.6.5	Unidad de control del espinterómetro de medición.	133
3.6.5.1	Principal (MAIN)	133
3.6.5.2	Control de distancias entre esferas	133
3.6.5.3	Indicador de la distancia entre esferas	134
3.6.6	Parte posterior	134
3.6.6.1	Conector de puesta a tierra	134
3.6.6.2	Conector de alimentación	134
3.6.6.3	Measuring sphere gap connector (CONECTOR DEL EXPLOSOR DE MEDICIÓN .AUX INFUT NR2)	134
3.6.6.4	Service (AUX-INPUT NR1)	134
3.6.6.5	Transducer	135
3.6.6.6	GEN.FIRING (TRIGATRON CONECTOR)	135
3.6.6.8	CRO1	135
3.6.6.9	SAFETY	135
3.6.7	Instrucciones de mantenimiento	135
3.6.7.1	Mantenimiento de rutina	135
3.6.7.2	mantenimiento extraordinario	136
3.7	Osciloscopio	136
3.8	El objeto baja prueba	136
3.9	El compresor	137

3.10	Rehabilitación del equipo generador de alto voltaje	137
3.10.1	Limpieza de la infraestructura del edificio de potencia	137
3.10.2	Limpieza general externa	138
3.10.3	Limpieza interna de cada uno de los módulos	140
3.10.4	Revisión y prueba de las uniones, conexiones, terminales, conductores y cables de los módulos	142
3.11	Prueba preliminar del funcionamiento del equipo	147
3.11.1	Solución al daño de la pieza del sistema neumático de puesta a tierra	148
3.12	Revisión y reparación de las tarjetas electrónicas del panel de control	151
3.12.1	Tarjeta electrónica de la unidad de servicio	151
3.12.2	Tarjeta electrónica de la unidad de regulación	152
3.13	Prueba y revisión del modulo de rectificación	155
3.14	Equipo de medición	162
3.15	Procedimientos para realizar la prueba impulso	167
3.16	Determinación de la capacitancia a tierra ( $C_T$ )	168
3.17	Determinación de la capacitancia de carga ( $C_b$ )	169
3.18	Determinación de la conexión Adecuada del generador	169
3.19	Generación del impulsa de tensión	174
3.19.1	Ajuste del voltaje de carga y Su polaridad	174
3.19.2	Ajuste del tiempo entre impulsos sucesivos	175
3.19.3	Ajuste de la distancia entre los explosores de las etapas	177
3.19.4	Medición del valor de cresta	180
3.19.5	Conexión del objeto de prueba	181
3.20	verificación de la -forma de onda	182
3.20.1	Instalación del osciloscopio	182

3.20.2 Conexión del osciloscopio al cable de medición	183
3.20.3 Disparo del osciloscopio	183
3.20.4 Almacenamiento de la onda impulso	183
3.20.5 Verificación de la forma de onda	183
3.21 La prueba de onda completa	184
3.21.1 Prueba de onda completa reducida	184
3.21.2 Prueba de onda completa plena	185
3.22 Prueba de onda recortada	185
3.23 Prueba de frente de onda	187
CONCLUSIONES DEL CAPITULO III	188
REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS	189

#### IV LA PRUEBA DE IMPULSO EN AISLADORES Y TRANSFORMADORES

##### Introducción

4.0 La prueba al impulso en aisladores	191
4.1 Generalidades	191
4.2 La prueba de choque térmico (Termal Shock)	192
4.2.1 Arreglo para la prueba	192
4.2.2 Equipo para la realización de la prueba	193
4.2.3 Método para realizar la prueba	193
4.2.4 Resultados de la prueba	193
4.3 Comportamiento del aislamiento bajo Lluvia y contaminación, ensayos y Normalización	194
4.3.1 Ensayos bajo lluvia	194
4.3.2 Conceptualización	194
4.3.3 Instalación para ensayos	196
4.3.4 Conductividad del agua	198
4.3.5 Propuestas de normalización	198
4.4 Ensayos bajo contaminación	199
4.4.1 Contaminación de estado sólido	199
4.4.2 Contaminación salina	199
4.4.3 La conducción de corriente ohmica En el aislamiento contaminado	200

4.4.4	Instalaciones de prueba	201
4.4.4.1	Cámara de ensayo	201
4.4.4.2	Electrodos auxiliares	203
4.4.4.3	Preparación de la mezcla contaminante	203
4.4.4.4	Preparación de la muestra	204
4.4.4.5	Determinación de la densidad	205
4.4.5	Prueba de la densidad del depósito Equivalente de sal, ESDD	205
4.4.5.1	Condiciones	206
4.4.5.2	Arreglo del montaje	206
4.4.5.3	Procedimiento para pruebas de Voltaje de aguante	209
4.4.5.4	Valor de la tensión crítica de flameo	210
4.4.5.5	Correcciones	211
4.4.5.6	Reporte de la prueba	212
4.4.6	Prueba de tensión de resistencia al impulso	213
4.4.6.1	Condiciones	214
4.4.6.2	Arreglo del montaje	214
4.4.6.3	Correcciones	214
4.4.6.4	Realización de la prueba	214
4.4.6.5	Determinación de la tensión de resistencia	215
4.4.6.6	Reporte de la prueba	215
4.4.6.7	Características eléctricas de los aisladores	216
4.4.7	Pruebas preliminares y resultados	220
4.4.7.1	Pruebas de medición de corriente de retorno a tierra	222
4.4.7.2	Prueba de medición de corriente de impulso	225
4.4.7.3	Las derivaciones blindadas para medir corrientes de impulso	226
4.4.8	Pruebas para determinar la forma de de onda estándar y voltaje del generador de alto voltaje	227
4.4.8.1	Condiciones atmosféricas estándar	230
4.4.8.2	Condiciones atmosféricas en el instante de la prueba	230
4.4.9	Pruebas específicas	232
4.4.9.1	Prueba para el aislador tipo pin	232
4.5	Prueba para el aislador tipo suspensión	235
4.5.1	Prueba para un solo aislador	235
4.5.2	Prueba para una cadena de dos aisladores	237
4.6	La prueba de impulso en transformadores	240
4.6.1	Generalidades	240
4.6.2	Aplicaciones de prueba impulso	241

4.6.2.1	La prueba impulso como control de calidad del diseño	241
4.6.2.2	La prueba impulso como control de calidad de fabricación	241
4.6.2.3	La prueba impulso como ensayos de recepción o aceptación de tipo	242
4.6.2.4	La prueba impulso como ensayo de aceptación de rutina	242
4.7	Clase de aislamiento en transformadores	242
4.7.1	Terminales de línea	242
4.7.2	Terminal de neutro	243
4.7.3	Bushing de transformadores	243
4.8	Metodología de la prueba impulso en Transformadores	243
4.8.1	Prueba de onda completa reducida (reduce fullwave)	244
4.8.2	Prueba de onda cortada (chopped wave)	244
4.8.3	Prueba de frente de onda (front waves)	244
4.8.4	Prueba de onda completa (Full Wave)	245
4.8.5	Terminales que no están siendo probadas	246
4.9	Pruebas impulso en el neutro de los Transformadores	250
4.9.1	Método 1: Prueba del neutro induciendo la tensión a través de un Terminal de línea	250
4.9.2	Método 2: Prueba del neutro por aplicación directa	251
4.10	Practicas de aterrizamiento	251
4.11	Detección de fallas	252
4.11.1	Oscilogramas de voltaje	252
4.11.2	Humo y burbujas	253
4.11.3	Ruidos audibles	253
4.11.4	Falla de un explosor al flameo	253
4.11.5	Oscilogramas de corriente a tierra	254
4.12	Metodología de evaluación por registro De corriente	255
4.12.1	Análisis de los oscilogramas	255
4.12.1.1	Interpretación de los oscilogramas de voltaje de onda completa y de corriente	255
4.12.1.2	Detección de fallas en los Oscilogramas de voltaje de ondas Completas plenas	256

4.12.1.3	Procedimientos de diagnostico especial	261
4.12.1.4	Efecto de la magnetización del núcleo en la detección de fallas	262
4.12.1.5	Detección de fallas en los oscilogramas de corriente	263
4.12.1.6	Interpretación de los oscilogramas de onda cortada y de frente de onda	259
4.13	Reporte de pruebas	275
4.13.1	Resumen de pruebas en transformadores	276
CONCLUSIONES DEL CAPITULO IV		278
REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS		280

## V ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DE LINEAS DE DISTRIBUCION AEREAS FRENTE AL RAYO

### Introducción

5.1	Parámetros de una descarga atmosférica	283
5.1.1	Definiciones	283
5.1.2	Parámetros	284
5.2	Introducción al comportamiento de las Sobretensiones de origen atmosférico	285
5.2.1	Análisis de las sobretensiones Originadas por rayos directos	286
5.2.1.1	Impacto en un conductor de fase	286
5.2.1.2	Impacto en un conductor de tierra	289
5.2.2	Análisis de las sobretensiones Originadas por rayos a tierra	293
5.2.2.1	Líneas monofásicas	293
5.2.2.2	Líneas monofásicas con cable de tierra	294
5.2.3	Análisis paramétrico	295
5.2.3.1	Estudio paramétrico en líneas sin cable de tierra	295
5.2.3.2	Estudio paramétrico en líneas con cable de tierra	302
5.3	Análisis usando el generador de impulso	307
5.3.1	Simulación de un elemento de prueba	312
5.4	Análisis de sobretensiones en líneas De distribución	316

5.4.1 Consideraciones sobre el comportamiento de las líneas de distribución ante descargas atmosféricas	316
CONCLUSIONES DEL CAPITULO V	318
REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS	319
CONCLUSIONES GENERALES Y RECOMENDACIONES	321
CONCLUSIONES	321
RECOMENDACIONES	323
ANEXO A	324
ANEXO B	339
ANEXO C	343

Trabajo dedicado a:

A Dios todopoderoso y a la virgen de Guadalupe por darme la oportunidad de lograr mis metas, ya que sin su ayuda no estaría en el lugar que me encuentro y no sería nadie.

A mis padres, Ana Margarita Cáceres y José Raúl Alvarado, ya que con su apoyo y dedicación me ayudaron a llegar a cumplir las metas que me propuse al inicio de mi carrera.

A mi novia, Sally Michelle ya que con su apoyo en momentos difícil estuvo para alentarme y darme ánimos para continuar a la cual amo mucho.

A mis hermanos, familias restantes y todas aquellas personas que estuvieron conmigo siempre y confiaron en mi capacidad para lograr mis propósitos.

A dos grandes amigas, Sofía Lorena Azahar y Alba Melina Alvarado por haber compartido grandes momentos a lo largo de mi carrera.

A amigos como, Mauricio Amilcar, Rocio, Ada Yanini, Carla, Wendy Wolmers, Rosaura, Teresa y todas aquellas personas con las que compartimos muchos momentos de alegría y tristezas.

## AGRADECIMIENTOS

A los Ingenieros: Numa Jiménez, Francisco Rodas, Mauricio Paz y Jorge Morales por su apoyo a continuar con este proyecto.

A la empresa Passoni-Villa por su valioso y desinteresado apoyo a la hora de brindar información técnica sobre los equipos.

A los Ingenieros de la empresa colombiana Gamma por su valiosa información que fue de gran utilidad.

A todas las personas que de una u otra forma brindaron su apoyo en la realización de este proyecto.

Vladimir Alexander Alvarado Cáceres.

Trabajo dedicado a:

Dios todo poderoso por ser mi guía mi pastor y por haberme permitido alcanzar mis propósitos y metas.

A mis padres, hermanos, familiares, y amigos quienes fueron de gran apoyo para poder alcanzar y culminar con tan anhelado propósito y meta.

A mi madre sobre todo por haberme dado ánimo, y fortaleza en los momentos que desfallecí y estuve a punto de dejar de estudiar esta carrera.

Reina Isabel Vides que es una persona muy especial para mi que estuvo conmigo todo el tiempo que la necesite en las buenas y en las malas para poder terminar y culminar esta meta.

Nuestros profesores a quienes debemos nuestra formación académica profesional.

La universidad a quien me debo como profesionales y espero representar con dignidad, honestidad y responsabilidad.

## AGRADECIMIENTOS

A los Ingenieros Cuadra y Alex Duarte de la distribuidora CAESS por el apoyo que dieron al presente trabajo de graduación.

A los laboratoristas Salvador Posada y Juan Olano por el apoyo tanto en el préstamo de herramientas como conocimientos de electrónica para poder salir adelante con el desarrollo de este trabajo de graduación.

A la ingeniero Claudia Arango Botero de ELECTROPORCELANA GAMMA. S.A. por el apoyo que dio con la información bibliográfica al presente trabajo de graduación.

A los compañeros Luís Fajardo Torres y Ricardo Salvador Chacon por el apoyo que dieron al presente trabajo de graduación.

Hugo Alberto Sosa Guardado

#### AGRADECIMIENTOS.

A Dios todopoderoso por darme vida, salud e inteligencia, sin lo cual no hubiese podido culminar mi carrera.

A mi madre que en paz descanse por brindarme su ayuda en todos los momentos que lo necesite, a mi padre quien siempre ha sido un pilar fundamental en mi vida y a mis hermanos que siempre han estado apoyándome en lo que a su medida ha sido posible.

A todos mis amigos que estuvimos juntos resolviendo diversos problemas que surgieron durante la etapa de estudio. Y a todos aquellos que de una u otra forma colaboraron en la realización de este proyecto. GRACIAS.

#### DEDICATORIA.

Especialmente a mi esposa e hijas por ser el centro principal de mi familia y expreso lo mucho que les estimo y amo.

A todos los estudiantes que se cultiven con el aporte de este trabajo y decirles que no desmayen pues la esperanza es lo ultimo que se pierde.

Santos Benjamín Velasco Castro

## PREFACIO

El equipo que forma parte de las redes de transmisión y distribución de energía eléctrica puede verse sometido a grandes sobretensiones como resultado de maniobras de interrupción dentro de la red, pero en la mayoría de los casos estas sobretensiones se producen como efecto de descargas atmosféricas cercanas o directamente en la red. Por esta razón es necesario que los dispositivos a instalar en la red sean capaces de soportar dichas sobretensiones, en caso de falla de las protecciones, a fin de garantizar la continuidad del servicio ante la presencia de estas.

Para comprobar si el equipo que ya ha estado en use o equipo nuevo a instalar en la red es capaz de soportar las sobretensiones por descargas atmosféricas a las que puede verse sometido dentro de la red, y para las cuales está especificado por el fabricante que es capaz de soportar, este es sometido a lo que se conoce como "La prueba de impulso", mediante la cual se simulan en el laboratorio las sobretensiones producidas por descargas atmosféricas con el generador de impulsos, el cual es diseñado para este fin.

La realización de la prueba de impulso tiene un precio elevado. Esto se debe en parte a la complejidad de la prueba, y en parte al alto costo del equipo necesario para la realización de la misma. En El Salvador esta prueba se solicita solamente cuando el costo del equipo adquirido lo justifica.

La Escuela de Ingeniería Eléctrica de La Universidad de El Salvador recibió en donación de la Comunidad Económica Europea (CEE), un laboratorio para la realización de la prueba de impulso, el cual fue dañado en el periodo de la guerra hasta esta fecha, lo que precisamente motivó la realización de este trabajo, teniendo como objetivos la realización de ensayos en elementos de circuitos de distribución, para cumplir este objetivo se tenía que rehabilitar el generador de impulso de alto voltaje iniciando con reunir la base teórica necesaria sobre la coordinación de aislamiento y reparación del equipo para la realización de la prueba vía puesta en marcha del laboratorio orientado hacia la aplicación de la prueba en transformadores, aisladores, interruptores y pararrayos, de los tipos utilizados en El Salvador.

Por ser la prueba de impulso un tema no muy conocido en El Salvador no se disponía en nuestro medio de toda la bibliografía de apoyo necesaria, pero con este trabajo ya se deja información necesaria y referencias así como las normas o estándares establecidos para la realización de la prueba.

En cuanto a información bibliográfica no hubo limitantes, solo ciertas limitaciones que tiene el laboratorio en este momento. A pesar de esto se han alcanzado los objetivos que se propusieron:

- Dejar una base teórica relativa a la coordinación de aislamiento, a la prueba de impulso y a la rehabilitación del laboratorio utilizado para la realización de las pruebas.

- La puesta en marcha del laboratorio de la prueba de impulso existente en la Escuela de Ingeniería Eléctrica.

- Sentar las bases para la realización y análisis de resultados de la prueba de impulso en transformadores y aisladores.

- Resultados de las pruebas realizadas en aisladores tipo pin y de suspensión para varios fabricantes.

Aún cuando los objetivos se han cumplido en su totalidad, el esfuerzo no ha sido infructuoso ya que el tema es tan amplio quedando por cumplir las normas de seguridad del laboratorio

## RESUMEN DEL TRABAJO

El presente documento es el resultado del trabajo que tenía como fin primordial la realización de ensayos en elementos de circuitos de distribución, la rehabilitación del generador de impulsos de alto voltaje y la instalación y puesta en marcha del laboratorio de la prueba de impulso de La Escuela de Ingeniería Eléctrica. La prueba de impulso forma parte de las conocidas como pruebas dieléctricas, a las que debe someterse el aislamiento del equipo eléctrico a fin de comprobar su integridad. Esta prueba es exigida por las normas americanas ANSÍ, IEEE y NEMA, así como por las normas europeas IEC. El aislamiento del equipo a instalar en un sistema eléctrico debe cumplir con lo que estas normas especifican.

Ya que el tema es poco conocido en El Salvador no se disponía de mucha información básica relativa a la prueba, ni menos aún del equipo necesario para su realización. En este contexto se planteó el desarrollo del trabajo en tres grandes etapas:

- Una primera etapa orientada a la recopilación de la información relativa a la coordinación de aislamiento en líneas de distribución a la prueba de impulso, al equipo a rehabilitar y utilizar.

Esta información se presenta en los capítulos I al III y comprende: Definiciones generales, el generador de impulsos, laboratorio de la prueba de impulso, condiciones de instalación y medidas de seguridad en pruebas de alta tensión. Esto constituye la primera parte de este documento.

- La segunda etapa se orientó a todos los procedimientos y pasos realizados para la reparación de cada uno de los módulos que componen en su totalidad el equipo generador de alto voltaje hasta hacer que el equipo funcionara.

Esta información se presenta en el capítulo III y comprende: los pasos y procedimientos realizados.

- La tercera etapa se orientó a la instalación del equipo, familiarización con su funcionamiento y la realización de pruebas de impulso en transformadores y aisladores, Apoyándose para esto del conocimiento ganado en el desarrollo de la primera y segunda etapa, así como información adicional recabada. Esta información se presenta en los capítulos IV, V. El capítulo III describe el equipo disponible para la realización y los procedimientos generales que deben seguirse para la realización de las distintas pruebas.

El capítulo IV presenta los procedimientos específicos, análisis y presentación de resultados de la prueba realizada en transformadores y aisladores. Esto constituye la tercera parte de este documento.

No se omite el expresar que algunos de los procedimientos presentados se basan en la experiencia de pruebas realizadas con el equipo disponible; mientras que otras se dan a nivel de puramente descriptivo debido a que no se disponía en el momento de la realización de este trabajo del equipo complementario para la realización de las mismas, Por esta razón algunos de los procedimientos podrían modificarse al disponer de equipo adicional, así como al ganar experiencia conforme se realicen pruebas.

Las pruebas que se pueden realizar con el equipo disponible son:

Para transformadores:

- Prueba de onda completa reducida,
- Prueba de onda completa plena,

Para aislador es:

- Prueba de tensión de resistencia al impulso.
- Prueba de tensión crítica de flameo,
- Prueba de tensión más baja de flameo,

Las pruebas que se presentan a nivel puramente descriptivo son:

Para transformadores:

- Prueba de onda recortada.
- Prueba de frente de onda

Para aisladores:

- Prueba de choque térmico.

## CAPITULO I

### COORDINACION DE AISLAMIENTO EN LINEAS DE DISTRIBUCION.

#### 1.0 Definiciones y Generalidades.

##### Introducción.

Para realizar un estudio de coordinación de aislamiento y sus protecciones en las redes de distribución, debe investigarse las causas y orígenes de los sobrevoltajes a los cuales estará sometida dicha red. El estudio de coordinación de aislamiento comienza con un análisis de los sobrevoltajes que se pueden estar presentes en una red; llegándose a establecer que las causas más frecuentes son debidas a descargas atmosféricas, de maniobra o temporales; ya sean de tipo directas o indirectas.

#### 1.1 Coordinación de aislamiento [1]

Se denomina coordinación del aislamiento al conjunto de procedimientos, utilizados principalmente para la especificación de los equipamientos, que tiene por objetivo fundamental la reducción, a nivel económico y operacional aceptable, de la probabilidad de fallas en los equipamientos y falta de suministro de energía, teniendo en cuenta las sobretensiones que pueden ocurrir en el sistema y las características de los dispositivos de protección.

En la actualidad, coordinar aislamiento, se refiere a la selección de la resistencia dieléctrica del aislamiento del equipo para relacionarla esta con las sobretensiones que aparecen en el sistema y utilizando los dispositivos de protección contra dichas sobretensiones.

La coordinación de aislamiento se puede estructurar de la manera siguiente:

- a. Diseñar el aislamiento para que sea capaz de resistir los esfuerzos dieléctricos a los cuales se vera sometido durante su operación.
- b. Coordinar el aislamiento con los elementos de protección contra sobretensiones. (apartarrayos, etc.)
- c. Definir los tipos de prueba y los valores de tensión a que se deben someter los aislamientos para que a nivel de laboratorio se demuestre que cumplen con el diseño.

Un aislamiento se debe diseñar para una cierta probabilidad de falla o riesgo de falla aceptable ya que si se diseña para que soporte cualquier esfuerzo de tensión y no presenta falla se puede llegar a un diseño costoso.

#### **1.1.1 Principios básicos de coordinación de aislamiento**

Para efectuar la coordinación del aislamiento se actúa en dos direcciones:

a. Las máquinas y los aparatos se construyen de manera que sean capaces de soportar sin daños las sobretensiones de tipo atmosférico o de origen interno (maniobra) contenidas dentro de ciertos niveles.

b. Con oportunos aparatos de protección y adoptando particulares criterios de construcción de las instalaciones, se trata de contener las sobretensiones dentro de los niveles tolerables para las máquinas y los equipos.

Las sobretensiones eléctricas se caracterizan por una magnitud y una duración y están, normalmente, asociadas a una probabilidad de ocurrencia.

#### **1.1.3 Clasificación del aislamiento [1].**

Los aislamientos, de una forma general, abarcan las distancias en aire, los aislamientos sólidos y los inmersos en líquido aislante. De acuerdo con la finalidad a que se destinan, se los clasifica como aptos para uso externo o uso interno, conforme se los utilice en instalaciones sujetas a agentes externos, tales como humedad, polución (contaminación), intemperie, etc., o no respectivamente. Además de esa clasificación, de orden general existe otra de mayor importancia, desde el punto de vista del aislamiento,

que es aquella que diferencia los aislamientos entre autoregenerativos y no regenerativos.

Los aislamientos autoregenerativos son aquellos que tienen capacidad de recuperación de su rigidez dieléctrica, después de ocurrida una descarga (ruptura dieléctrica) causada por la aplicación de una sobretensión.

En una subestación, los aislamientos autoregenerativos de los componentes pueden ser clasificados en dos grupos, dependiendo del tipo de utilización. El primer grupo es el de los aislamientos de los equipamientos, tales como: parte externa de los aisladores de los transformadores de potencia, reactores y transformadores de medición y parte externa de los equipamientos de maniobra y de medición (interruptores, seccionadores y divisores capacitivos de tensión). Las partes internas de esos equipamientos, son de tipo no regenerativo y, por lo tanto, los equipamientos citados anteriormente poseen ambos tipos de aislamientos.

El segundo grupo de aislamientos es el que se refiere, solamente, a instalaciones propiamente dichas. En este grupo están incluidos los aislamientos en aire, correspondientes a la distancia conductor-estructura, barras-estructura, parte con tensión del equipamiento-estructura y conductor-conductor, los soportes aisladores, las cadenas de aisladores y las columnas aislantes de las bobinas de bloqueo. Todos estos son regenerativos.

Los aislamientos no regenerativos son aquellos que no tienen capacidad de recuperación de su rigidez dieléctrica, después de la ocurrencia de una descarga causada por la aplicación de una sobretensión. Habiendo la descarga dañado parcial o totalmente el aislamiento no regenerativo. Los elementos más importantes de una subestación están constituidos por este tipo de aislamiento, principalmente en su parte interna, como los transformadores de potencia, etc.

#### 1.1.4 Fenómenos particulares [2].

Una onda viajera mantiene prácticamente las mismas características (forma) en cualquier punto de la línea, y también en función del tiempo, hasta que no se verifique una discontinuidad en los parámetros de la línea misma. Es necesario examinar que ocurre cuando las ondas viajeras de tensión y corriente alcanzan estos puntos singulares.

En cada instante se cumple la relación

$$Z = v/i$$

Ecu. (1.1)

Siendo  $Z$  la impedancia característica de la línea.

En los puntos de discontinuidad se verifican entonces fenómenos de reflexión y refracción: el primero de estos fenómenos admite que parte de la onda incidente sea rechazada hacia el punto de origen, mientras que el fenómeno de refracción se refiere a aquella parte de la onda que prosigue su camino en el sentido en que se originó.

### 1.1.5 Fenómeno de resonancia [5].

Una causa de sobretensiones es la producción de oscilaciones forzadas, que acaba por producir resonancias. Estas resonancias resultan muy peligrosas en tramos de gran longitud de conductores y cables de alta tensión, así como en generadores cuyas curvas de tensión están deformadas por armónicos de orden superior.

En la mayor parte de los casos los fenómenos de resonancia se presentan a continuación de fallas, y en particular con la interrupción de los conductores.

Como ejemplo, un caso frecuente que puede verificarse en las instalaciones, se muestra en la figura 1.1 donde se considera una línea que alimenta un transformador en vacío, en la cual se tiene la interrupción de un conductor. Las capacidades  $C_1$  y  $C_2$  representan la capacidad a tierra de los tramos de conductor interrumpido, se desprecia la capacidad existente entre el conductor interrumpido y el vano y entre éste último y tierra.

Estas simplificaciones son lícitas para un examen cualitativo de los fenómenos que consideramos. Considerando en  $R$  todas las resistencias del circuito y de los elementos disipativos en él contenidos, se tiene la siguiente ecuación:

$$V = \left( R - j \frac{1}{\omega C_1} - j \frac{1}{\omega C_2} + j \omega L \right) I \quad \text{Ecu. (1.2)}$$

Las condiciones de resonancia se presentan cuando:

$$\frac{1}{\omega C_1} + \frac{1}{\omega C_2} = \omega L \quad \text{Ecu. (1.3)}$$

Los efectos que los fenómenos de resonancia pueden provocar se deben estudiar considerando la sobretensión entre bornes del transformador y entre los conductores de la línea, que

pueden dar lugar a arcos externos o perforación de los aislantes líquidos o sólidos en el transformador.

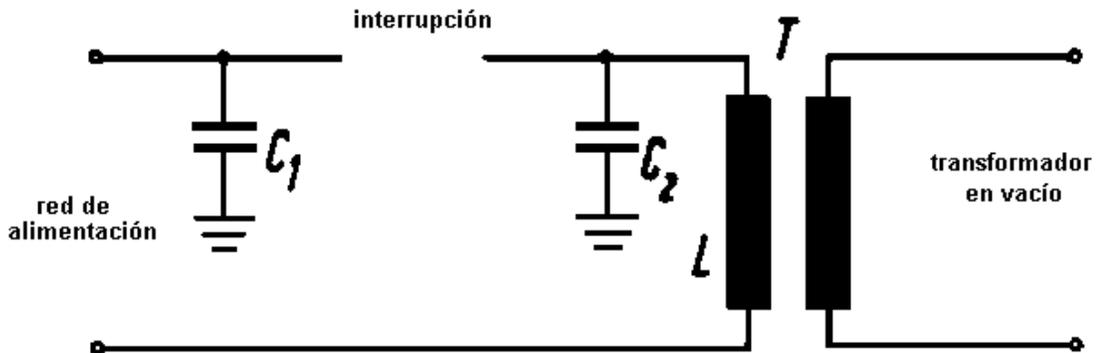


Figura 1.1. Fenómeno de resonancia.

#### 1.1.6 Fenómeno de ferresonancia [9].

Fenómenos más complejos que los anteriormente descritos se pueden presentar por la presencia de circuitos magnéticos saturables.

La ferresonancia es un fenómeno de resonancia no lineal que puede afectar a la red eléctrica. Las tasas de armónicos anormales, las sobretensiones o las sobreintensidades transitorias o permanentes que provoca suelen ser peligrosas para materiales eléctricos.

La principal característica de este fenómeno es la de presentar al menos dos regímenes permanentes estable. Aparece a continuación de transitorios, sobretensiones de origen atmosférico, conexión o desconexión de transformadores o de cargas, etc.

En resumen, el fenómeno de la ferresonancia es un fenómeno complejo caracterizado por:

- Una multiplicidad de regímenes permanentes para un circuito dado,
- Una gran sensibilidad de la aparición de estos regímenes a los valores de los parámetros de la red,

Elementos de diagnóstico:

La ferresonancia se manifiesta por varios de los siguientes síntomas:

- Sobretensiones permanentes elevadas de modo diferencial (entre fases) o de modo común (entre fases y tierra),
- Sobreintensidades permanentes elevadas,
- Grandes distorsiones permanentes de las formas de onda de tensión y corriente,
- Desplazamiento de la tensión del punto neutro,
- Calentamiento de los transformadores (en funcionamiento sin carga),
- Ruido permanente y excesivamente fuerte dentro de los transformadores y reactancias,

Las diferencias fundamentales entre un circuito ferorrresonante y un circuito resonante lineal son:

- Posibilidad de resonancia dentro de una gran gama de valores de parámetros,
- La frecuencia de las ondas de tensiones y de corrientes puede ser distinta de la de la fuente senoidal,
- La existencia de varios regímenes permanentes estables para una configuración y los valores de parámetros dados.

La ferroresonancia puede ser monofásica (caso anterior). Se dice que es trifásica cuando hay un acoplamiento magnético no lineal entre las fases; se dice trimonofásica en la ausencia de acoplamiento entre las tres no linealidades. La ferroresonancia es de tipo serie o paralelo.

## 1.2 Sobretensiones [6].

Se denomina sobretensión a todo aumento de tensión capaz de poner en peligro el material o el buen servicio de una instalación eléctrica

La relación entre la sobretensión  $U_s$ , y la tensión de servicio  $U$  se llama factor de sobretensión que viene expresado por:

$$K_s = \frac{U_s}{U} \quad \text{Ecu. (1.4)}$$

Las sobretensiones pueden producir descargas que, además de destruir o averiar seriamente el material, también pueden ser la causa de nuevas sobretensiones. Muchas veces, los peligros de las sobretensiones no se deben solamente a su magnitud, sino también a la forma de onda. Si se realizan correctamente la instalación y las líneas de conexión están en buenas condiciones es poco probable que se produzcan sobretensiones.

Las sobretensiones que se presentan dependen de factores externos a la red, de características de componentes de la red, y de características de diseño de la red.

Los valores de sobretensiones que se presentan están relacionados con las características de puesta a tierra del sistema eléctrico, pudiendo éste estar conectado rígidamente a tierra o aislado o en condiciones intermedias conectado a tierra a través de una impedancia (resistencia o reactancia).

### 1.2.1 Origen de las sobretensiones [2].

Las sobretensiones pueden ser clasificadas por su origen en forma muy amplia en dos grupos: sobretensiones externas y sobretensiones internas, respectivamente. Esta clasificación es meramente académica y no tiene en cuenta los intereses relacionados con la especificación de los equipamientos, siendo más adecuada otra clasificación, asociada con el tiempo de duración y el grado de amortiguamiento de las sobretensiones. Basándose en este concepto, por su forma y duración, se clasifican en sobretensiones de tipo atmosférico, sobretensiones de tipo de maniobra y sobretensiones temporarias.

a) **Las sobretensiones atmosféricas:** están caracterizadas por un frente de onda de algunos microsegundos a pocas decenas de microsegundos. Una sobretensión de cualquier otro origen, que tenga características de frente de onda similares a las utilizadas para definir las sobretensiones atmosféricas, también se clasifica como sobretensión atmosférica.

La figura 1.2 representa un ejemplo típico de una sobretensión atmosférica, obtenida en bornes de un transformador de un estudio de inyección de sobretensiones en una subestación, incluyéndose, por lo tanto, el efecto de los descargadores que limitan la amplitud de la sobretensión.

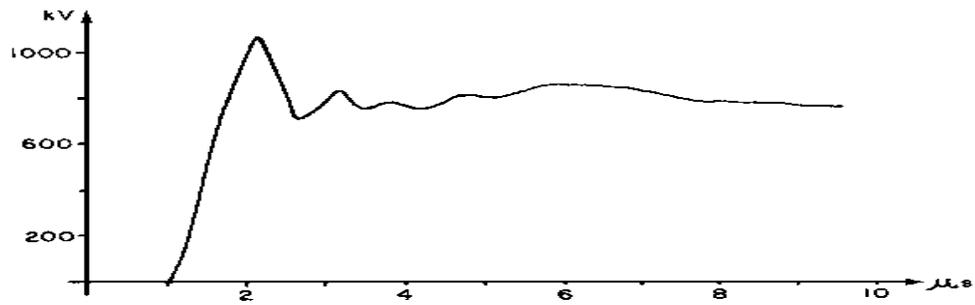


Figura 1.2 Sobretensión atmosférica.

b) **Las sobretensiones de maniobra:** resultan, principalmente por la apertura y cierre de circuitos y de fallas en el sistema eléctrico.

La figura 1.3 representa un ejemplo típico de una sobretensión de maniobra fuertemente amortiguada, que corresponde a una simulación de energización de una larga línea (alimentada de un extremo y abierta en el otro extremo).

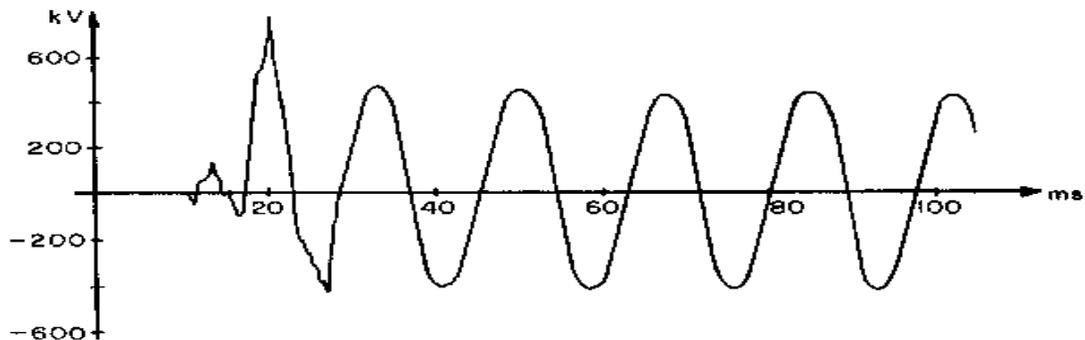


Figura 1.3 Sobretensión de maniobra fuertemente amortiguada.

Los ejemplos más comunes de eventos que provocan sobretensiones de maniobra son energización y reconexión de líneas de transmisión, ocurrencia de fallas con desplazamiento del neutro y eliminación de fallas, energización de transformadores y reconexión de carga.

c) **Las sobretensiones temporarias:** se caracterizan, principalmente, por su larga duración y picos de amplitud reducida. Están asociadas comúnmente a maniobras de

reconexión de carga, ocurrencia de fallas con desplazamiento de neutro y energización de líneas en vacío.

### 1.2.2 Causas y efectos de las sobretensiones.

En un sistema trifásico, equilibrado, la tensión hacia tierra es la tensión de fase

$$E_{fase} = \frac{E_{línea}}{\sqrt{3}} \quad \text{Ecu. (1.5)}$$

Las causas de sobretensiones pueden ser varias, y se enumeran a continuación las más frecuentes.

1. Las ondas de sobretensión, llamadas ondas viajeras se reflejan y refractan en los puntos de discontinuidad de la impedancia de las líneas variando su forma.

2. Una nube cargada produce sobretensiones estáticas de inducción capacitiva, y al desplazarse o descargarse la nube la sobretensión en la línea se desplaza en forma análoga a las sobretensiones atmosféricas.

3. Efectos análogos al frotamiento, debidos al viento (seco) producen cargas electrostáticas en las líneas.

4. Pueden producirse contactos entre una parte del sistema de tensión inferior, con un sistema de tensión más elevada, y en consecuencia se presentarán peligrosas sobretensiones en el sistema de tensión inferior.

5. Las vibraciones pueden producir condiciones de falla intermitente (cortocircuitos repetidos) y causar sobretensiones de importancia por carga de capacitancias.

6. Las conexiones en autotransformador en casos de falla del circuito, del lado alimentación, implican sobretensiones del lado carga que pueden ser inadmisibles.

7. Capacitancias e inductancias pueden producir condiciones de resonancia y en consecuencia sobrecorrientes y/o sobretensiones, como generalmente hay núcleos de hierro en muchos casos se pueden presentar fenómenos de ferresonancia.

8. Las maniobras de interrupción, son origen de sobretensiones, de mayor o menor importancia según sea la forma de interrumpir del aparato, y las características del circuito.

9. El establecimiento de corriente en ciertos circuitos, el restablecimiento de corriente (durante una interrupción) puede dar lugar a sobretensiones.

10. Las interrupciones bruscas de cargas, crean también sobretensiones en determinados puntos del sistema. Así se justifican los ensayos con sobretensiones:

- De **frecuencia industrial**, que simulan condiciones originadas en contactos, desconexión de cargas, resonancia, etc.
- De **maniobra**, debidas a esta causa, y que se simulan con impulsos de tensión que crecen en tiempos de los 100 microsegundos y duran del orden de los 1000 microsegundos.
- De **impulso**, que simulan descargas atmosféricas que crecen en tiempos del orden de 1 microsegundo y duran del orden de 50 - 100 microsegundos.

Las sobretensiones que se producen son totalmente distintas, y en consecuencia los aparatos deben tener características adecuadas para soportarlas.

La amplitud de las sobretensiones está especialmente ligada a la conexión más o menos efectiva del neutro del sistema a tierra.

Las sobretensiones de origen interno están ligadas a la tensión nominal del sistema a través de algún coeficiente que depende de la puesta a tierra.

En cambio, las sobretensiones de origen externo tienen una amplitud que no depende de la tensión nominal del sistema.

En su propagación por las líneas la amplitud de las sobretensiones queda limitada por fenómenos de efecto corona, o por descargas en determinados puntos.

Para limitar el valor de estas sobretensiones, y proteger al sistema de descargas atmosféricas se instalan descargadores.

A veces a los descargadores se les asigna la función de drenar también las sobretensiones de maniobra.

### 1.2.3 Comparación de las sobretensiones [2]

La figura 1.4 muestra un ejemplo para la comparación entre la duración de los distintos tipos de sobretensiones que se presentan en el sistema eléctrico.

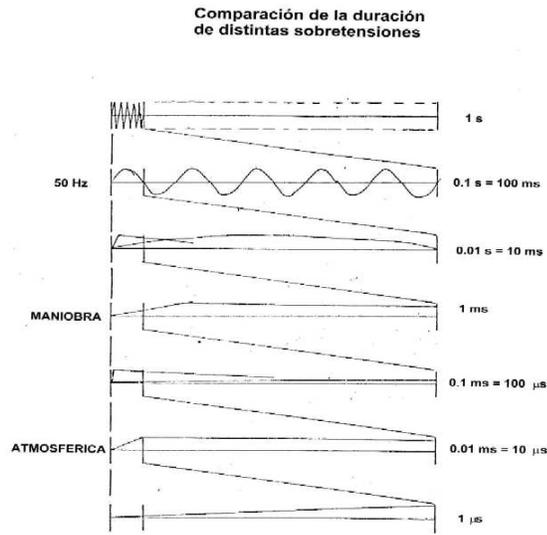


Figura 1.4. Duración de distintos tipos de sobretensiones.

El nivel de las sobretensiones depende de la configuración de la red y del punto considerado, y en general es tanto menor cuanto más mallada es la red y cuantas más puestas a tierra de neutros se tengan.

La descarga en la estación es poco probable, por la superficie relativamente reducida, en comparación a la línea, es decir que es más probable que las sobretensiones lleguen desde las líneas.

Mientras que las sobretensiones atmosféricas afectan una sola fase, o afectan a todas las fases en forma similar, las sobretensiones de maniobra afectan a dos o las tres fases simultáneamente; es entonces importante el estudio de su efecto sobre la aislación fase-fase.

Cada punto del sistema eléctrico se caracteriza por distintos valores de sobretensiones de los distintos tipos, modernamente estos valores se definen en forma estadística.

### 1.3 Normas y generalidades.

- Normalización: se entiende el conjunto de aquellos criterios de índole general en base a los cuales deben ser proyectadas, construidas y ensayadas las instalaciones, las máquinas, los aparatos o los materiales objeto de las normas mismas, a fin de

garantizar la eficiencia técnica y la seguridad de funcionamiento.

- Unificación: se entiende el conjunto de prescripciones que fijan para la máquina, el aparato o el material objeto de unificación una estrecha gama de tipos constructivos y de dimensiones entre los infinitos posibles a fin de reducir los costos, de facilitar el aprovisionamiento de los repuestos y de permitir la reducción de las reservas en almacén.

Normalización y unificación liberan a las iniciativas de todas aquellas manifestaciones irracionales que no podrán producir ventajas ni a la comunidad, ni a sus mismos promotores. Tales iniciativas pueden requerir algún sacrificio a la libertad individual, pero este sacrificio debe ser evaluado en función de las ventajas de carácter colectivo que se consiguen.

### **1.3.1 La normalización en el campo eléctrico.**

En campo internacional los trabajos de normalización electrotécnica son competencia del Comité Electrotécnico Internacional (IEC International Electrotechnical Commission).

Para obtener su finalidad el IEC publica recomendaciones internacionales (muchas de las cuales con el nombre de Normas Internacionales) que expresan dentro de los límites más amplios posibles un acuerdo internacional sobre los argumentos tratados.

Tales recomendaciones están destinadas a ayudar a los Comités Nacionales en la elaboración de las normas del propio país, de manera de armonizar las prescripciones técnicas de las distintas naciones y facilitar los intercambios de materiales.

### **1.3.2 La aislación y las normas**

Los conceptos ligados a las normas y unificaciones tratados deben servir de introducción al análisis de las características de aislación que nos interesan examinar para los sistemas y aparatos eléctricos.

La razón es que se ha desarrollado un enorme trabajo de normalización desde que se entendió la enorme importancia de las características de la aislación en los sistemas eléctricos.

Sin duda la aislación es uno de los temas que más afecta el costo de las instalaciones eléctricas y condiciona los progresos.

#### 1.4. Aterrizajes y protección contra cargas estáticas o rayos.

##### 1.4.1 Aterrizaje de cargas estáticas.

La acumulación de cargas estáticas en el equipo o materiales que se están procesando y sobre el personal de operación produce un potencial serio en los lugares en los que se encuentran líquidos o gases inflamables, fibras o desperdicios.

La generación de electricidad estática no se puede prevenir, pero se puede mitigar y controlar dando medios para juntar las cargas que se separan, tan rápidamente como se producen y antes de alcanzar los niveles de chispeo. Los métodos que se usan son:

1. **Aterrizaje y conexión.** Muchos problemas de estática se pueden resolver uniendo las diferentes partes del equipo y aterrizando el sistema completo.
2. **Control de humedad.** Muchos materiales aislantes como: cuero, madera, papel o concreto, contienen cierta cantidad de humedad en equilibrio con el aire que les rodea. Esta humedad o humedad relativa controla la conductividad de la superficie de estos materiales aislantes. A mayor humedad, mayor conductividad. Cuando la humedad relativa es de 30% o menos, los mismos materiales se secan y se convierten en buenos aisladores; se comienzan a notar las manifestaciones estáticas y se pueden generar chispas estáticas.
3. **Ionización.** En el proceso de ionización, las moléculas de aire están sobre-tensionadas, los electrones se separan de sus moléculas. Los electrones son negativos y las moléculas quedan con cargas positivas.
4. **Calzado y rodos conductivos.** Se usan en combinación con el piso conductivo. El equipo móvil debe tomar contacto directamente con el piso o a través de los rodos conductivos de hule. Se debe verificar su resistencia siempre, antes de entrar a las áreas de trabajo.
5. **Precauciones especiales.** Además de los pisos y calzado conductivos, se pueden considerar otros controles como: usar ropa que produzcan estática baja, establecer procedimientos rígidos de operación, uso de tapetes conductivos de hule en lugares donde no hay piso conductivo.

#### **1.4.2 Aterrizaje para protección contra rayos [3].**

El rayo es la descarga de celdas de potencial alto (generalmente negativas), entre nubes y la tierra. Estas celdas cargadas en las nubes atraen cargas opuestas sobre la superficie de la tierra, directamente debajo de ellas.

Cuando la carga de la celda alcanza un nivel crítico (cuando se rompe el aislamiento entre la nube y la tierra), se establece una trayectoria ionizada escalonada, frecuentemente a tierra, produciendo una corriente elevada de descarga (de golpe), que neutraliza momentáneamente las cargas de las nubes y tierra.

La corriente aumenta desde cero hasta un máximo, en un tiempo de 1 a 10 microsegundos, luego declina a la mitad del valor pico en un tiempo de 20 a 1,000 microsegundos.

Esta descarga se puede repetir una o varias veces, sobre la misma trayectoria, en sucesión rápida, como resultado de la recarga de la celda original, debido a descargas internas que proceden de celdas vecinas.

El promedio de la corriente pico de golpe es cerca de 20,000 amperios, aunque en algunos casos se han detectado corrientes de hasta 270,000 amperios.

El punto en que se producen las descargas, generalmente es un punto elevado, como: un árbol, un edificio, una línea de transmisión y sus torres o alguna estructura elevada similar.

El retorno a tierra de esas cargas se conoce como descargas inducidas y puede alcanzar varios cientos de amperios, puede dañar algunos materiales sensibles, como los inflamables o explosivos.

#### **1.5 Sobretensiones debidas a descargas atmosféricas rayos [3].**

Podemos decir que básicamente las redes eléctricas están sometidas a los siguientes tipos de perturbaciones:

- 1 - Perturbaciones internas temporales de duración prolongada
- 1 - Perturbaciones internas de maniobra
- 2 - Perturbaciones externas o atmosféricas

En esta parte se analizarán las perturbaciones externas, que se caracterizan por ser de una duración más reducida que las restantes y muy fuertemente amortiguadas. Las mismas son las causantes del mayor número de fallas y se producen generalmente por la caída de un rayo sobre las líneas.

En este caso, el carácter aleatorio de ciertos parámetros, como la intensidad del rayo, el punto de caída, etcétera; determinan que dichas sobretensiones no puedan definirse mediante un valor concreto para una instalación dada, sino como una distribución de probabilidad de alcanzar una serie de valores.

Cabe señalar que las distintas normas establecen ondas de choque típicas para simular la acción de la caída de rayos sobre líneas de energía eléctrica.

En el caso de impacto del rayo sobre una línea, el rayo puede caer sobre un conductor de fase, y puede formar un arco entre el conductor y un apoyo estructural; o bien puede caer sobre un apoyo o un hilo de guarda, en cuyo caso se puede llegar a producir un arco en el sentido inverso al del caso anterior.

Dado el nivel de aislamiento de una línea, se observa que sólo se produce falla de la misma si la intensidad del rayo que cae sobre un conductor supera cierto valor crítico. En la práctica, la mayor parte de los rayos que caen sobre un conductor de fase dan lugar a una falla de aislamiento. Los hilos de guarda se colocan por encima de los conductores de fase y están unidos a tierra en los apoyos de la línea. De esta manera se reduce el riesgo de caída directa del rayo sobre los conductores.

Por el contrario, para líneas de media tensión (inferiores a 46 kV), las distancias de aislamiento son suficientemente bajas como para que la probabilidad de cebado inverso sea casi la unidad, no teniendo ningún efecto la instalación de hilos de guarda sobre el riesgo de falla de la línea. Si el rayo cae sobre un hilo de guarda, se originan dos ondas de intensidad de valor mitad del correspondiente al rayo, que caminan en sentidos opuestos hacia los apoyos, por los cuales se descargan. Acompañando a estas ondas aparecen otras dos de tensión, cuyo valor depende de la impedancia involucrada.

Otro tipo de perturbación externa de origen atmosférico se da cuando hay nubes de tormenta en la vecindad de una línea.

Por ejemplo en el caso de las descargas atmosféricas puede producirse el contorneo de los aisladores sin destruirlos.

También las oscilaciones de las líneas por acción del viento pueden provocar fallas momentáneas entre las fases. Ramas y pájaros también provocan fallas transitorias.

### 1.5.1 Análisis estadístico [8].

Por lo expuesto en el apartado anterior, se desprende que para estudiar la incidencia de las sobretensiones por rayos en las redes aéreas debe recurrirse a métodos estadísticos, en virtud del carácter aleatorio de los distintos parámetros de dichas sobretensiones externas. Por tal razón, se suele hablar de una distribución de probabilidad de alcanzar una serie de valores. La experiencia indica que en primera aproximación, puede considerarse a dicha distribución como normal o gaussiana. Distintos modelos se han desarrollado para analizar esta cuestión, y periódicamente aparecen nuevas versiones para simular de mejor forma la acción de los rayos sobre las líneas. A continuación se presentarán los puntos más importantes de uno de ellos, como una introducción al tema y para ilustrar la cuestión.

Un dato básico para el diseño de una línea frente al rayo es la frecuencia de caída de rayos ( $N_r$ ) por unidad de superficie y por unidad de tiempo. Esta frecuencia  $N_r$  generalmente se expresa en número de rayos por  $\text{km}^2$  y por año.

Este valor es función del nivel isoceráunico ( $T$ ) de la zona, que es el valor medio de los días de tormenta al año en dicha zona. Una expresión empírica que los relaciona es:

$$N_r = T / 6 \quad \text{Ecu. (1.6)}$$

El valor  $T$  debe consultarse en los mapas de niveles isoceráunicos correspondientes a la región en que se instalará la línea en estudio.

No todos los rayos que caen sobre un conductor de fase producen falla, ya que es necesario que su intensidad de cresta  $I$  sea tal que ocasione que las dos ondas generadas de sobretensión  $U_s$  sean superiores a la de cebado de la aislación:

$$U_s = I * Z_c / 2 \quad \text{Ecu. (1.7)}$$

Donde  $Z_c$  es la impedancia de onda del conductor, que vale:

$$Z_c = 60 * \ln (2 Y_m / R_e) \quad \text{Ecu. (1.8)}$$

En la expresión anterior,  $Y_m$  representa la altura media del conductor y  $R_e$  el radio geométrico medio del conjunto de subconductores de fase.

De esta forma, sólo los rayos de intensidad superior a un cierto valor crítico  $I$  darán lugar a una falla si caen sobre un conductor de fase.

Por otro lado, la probabilidad de caída de un rayo sobre un conductor de fase está muy influenciada por la existencia o no de hilos de guarda, y de existir, de su posición relativa.

### 1.5.2 Hilos de guarda y disposición de los conductores [5]

De lo dicho resulta que la mejor solución para proteger líneas aéreas contra sobretensiones atmosféricas sería impedir que éstas entren en los conductores de líneas aéreas.

Para eliminar totalmente la influencia del campo electrostático atmosférico sobre los conductores habría que construir alrededor de ellos una jaula de Faraday, lo que es económica y técnicamente imposible. Sin embargo, la experiencia confirma que uno o dos cables colocados sobre los conductores de fase y paralelos a éstos garantizan una discreta protección contra golpes de rayo directos.

Tales cables de protección denominados hilos de guarda o hilos de tierra se colocan en el extremo más alto de los soportes y se conectan mediante la misma estructura del soporte a tierra. Generalmente se utilizan como hilos de guarda cables de acero con secciones de 25 hasta 50 mm<sup>2</sup>. La probabilidad de golpes de rayo directos en los conductores disminuye en líneas protegidas con dos hilos de guarda hasta un valor casi despreciable.

La eficiencia de la protección con hilos de guarda depende de la posición de los hilos respecto de los conductores, pero siendo las relaciones muy complicadas ya que existen muchos factores independientes, no es posible hallar una solución analítica del problema, sino solamente una aproximación experimental.

Existen varios criterios sobre la mejor posición de los hilos de guarda.

La zona protegida por los hilos de guarda, está determinada por círculos de radios iguales a la altura sobre el suelo del hilo de protección, como está representado en las figuras 1.6.a, 1.6.b y 1.6.c siguientes:

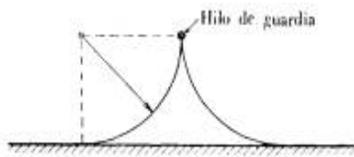


Figura 1.6.a

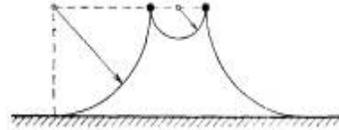


Figura 1.6.b

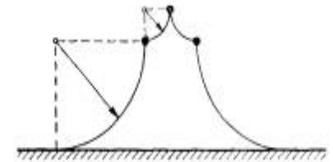


Figura 1.6.c

Zonas de protección formadas por 1, 2 y 3 hilos de guardia. La zona propiamente protegida, está aún disminuida por una zona de dispersión que hay que tomar en cuenta con un ancho del 2 al 4 % del radio correspondiente, ver figura 1.6.d y 1.6.e.

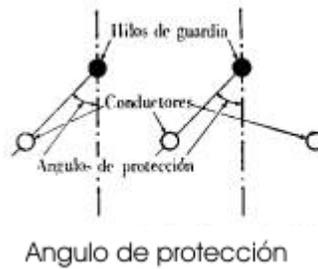


Figura 1.6.d. Ángulo de protección.

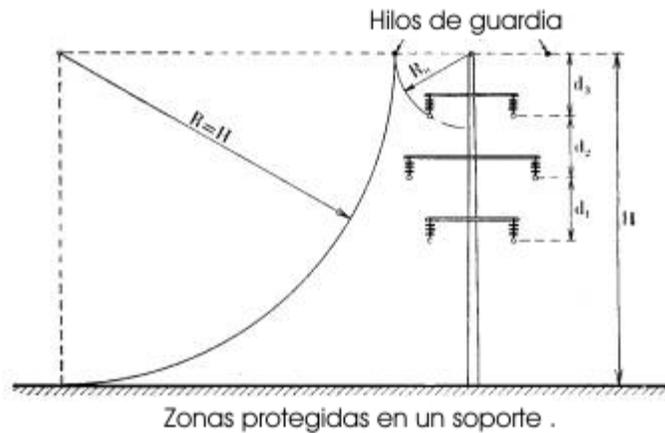


Figura 1.6.e. Zonas protegidas en un soporte.

Se puede definir la posición de los hilos de guardia, mediante el ángulo de protección. Se considera que un ángulo menor de  $40^\circ$  ó  $30^\circ$ , entre el hilo de protección y conductores, asegura la línea contra los golpes directos.

Las alturas de los soportes construidos de acuerdo con este criterio.

Con lo dicho quedarían definidos los criterios para la disposición de los conductores y de los hilos de guarda, pero los hilos de guarda colocados sobre los conductores de línea, aún si soportan el golpe de rayo, no garantizan por sí mismos una eficaz protección del sistema, si la aislación de la línea no se ajusta a las consecuencias que produce el golpe de rayo en el hilo de guarda.

### **1.6 Ondas errantes.**

Se llaman así las ondas de tensión que se desplazan con gran velocidad a lo largo de los conductores. Estas ondas pueden provocar elevadas sobretensiones, unas veces porque su propia amplitud sea mayor que la tensión de servicio, otras veces porque el valor de su amplitud se incremente por reflexión o por cualquier otra causa.

Generalmente, estas ondas tienen forma periódica, con crecimiento rápido hasta el valor de cresta, que después decrece lentamente. Veamos como se forman las ondas errantes.

### **1.7 Nivel Isocerámico [3].**

Las sobretensiones de origen atmosférico son una de las principales causas de fallas y averías en redes de transporte y distribución de energía eléctrica. El cálculo de este tipo de sobretensiones se debe realizar con muchas incertidumbres, dada la naturaleza aleatoria del rayo y el conocimiento poco preciso de sus principales parámetros. El análisis de sobretensiones de origen atmosférico tiene como objetivo final determinar el riesgo de fallo o la tasa de contorneos en una línea por km y año.

#### **1.7.1 Polaridad.**

Ya se ha mencionado que en el estudio y cálculo de sobretensiones un rayo puede ser visto como una fuente de corriente que puede tener polaridad positiva, negativa o ambas en una misma descarga, lo que se conoce como onda bipolar. La probabilidad de que se presente una descarga de este último tipo es muy baja.

Por lo que respecta a las descargas monopolares (cargas positivas o negativas) se pueden distinguir los siguientes cuatro tipos:

- a. El primer tipo de rayo, "negativo descendente", predomina en las construcciones de altura inferior a 100 metros. Entre el 85 y el 95% de los rayos que caen sobre éstas construcciones son negativos y descendentes. La corriente media es aproximadamente de 33 kA.
- b. El segundo tipo de rayo es conocido como "ascendente negativo". Estos predominan en las construcciones altas, y tienen una corriente media inferior a los 25 kA.
- c. El tercer tipo de rayo es el "ascendente positivo", también conocido como "súper rayo". Aproximadamente el 14% de los rayos son de este tipo. Las magnitudes de la corriente son aproximadamente de 1.2 a 2.2 veces superior a la del rayo negativo descendente. Sólo del 2 al 10% de los rayos tienen polaridad positiva.
- d. El cuarto tipo de rayo es el "descendente positivo una minoría apreciable de rayos lleva la carga positiva a la tierra. Estos ocurren en la fase de disipación de una tormenta. Los rayos descendentes positivos son comunes durante los meses de invierno.

Aproximadamente del 85 a 95% de los rayos que caen sobre construcciones de altura inferior a los 100 metros, y situadas sobre terrenos planos u ondulados, son rayos negativos descendentes.

Todos los rayos procedentes de una nube tienden a impactar en tierra dentro de un área circular de aproximadamente 10 km de diámetro, dentro de este área el impacto es aleatorio. Existe una probabilidad alrededor de un 20 % de que una segunda descarga caiga entre 2 y 4 km de la primera, y existe una probabilidad más pequeña de que una descarga caiga a unos 8 km o más de la primera. El valor medio de la distancia entre sucesivos puntos de impacto se encuentra en unos 3.5 km. El comportamiento de las descargas atmosféricas tiene un marcado carácter aleatorio, por lo que generalmente es necesario un elevado número de medidas para determinar con precisión su distribución.

### 1.7.2 Densidad de rayo.

La densidad de rayos a tierra por  $\text{km}^2$  y año,  $N_g$ , es otro parámetro importante. Éste es un dato mal conocido y puede variar mucho en años consecutivos para una misma región.

Las estadísticas mejor conocidas hacen referencia al número de días de tormenta al año,  $T_d$ , o al número de horas de

tormenta al año,  $T_d$ , que se registran en un punto determinado. Ambos valores son conocidos como nivel cerámico. La relación entre nivel cerámico y densidad de rayos se puede aproximar de la siguiente forma:

$$N_g = kT_d^a \quad \text{Ecu. (1.9)}$$

Donde:  $T_d$  es el nivel cerámico en número de días de tormenta por año,  $k$  y  $a$  son constantes para las que se han propuesto muchos valores.

La fórmula aceptada por IEEE es la siguiente:

$$N_g = 0.04T_d^{1.25} \quad \text{Ecu. (1.10)}$$

Puesto que esta aproximación no es suficientemente precisa, es decir no existe una buena correlación entre la densidad de descargas a tierra y el nivel cerámico, lo más fiable es utilizar las estadísticas y mediciones directas.

El siguiente análisis está basado en datos obtenidos de varias fuentes y están aplicados estrictamente para El Salvador:

La tabla 1.1 muestra una recopilación de las descargas atmosféricas que sucedieron para el año 2003; cabe mencionar que muestra un combinado de datos, los cuales se obtuvieron de dos maneras diferentes. En la tabla 1.1, se analizó la información obtenida de parte de ETESAL, con el análisis de la información que se obtuvo de la página de la NASA.

La tabla 1.1, es, asimismo, la recopilación de datos la cual se obtuvo analizando las distintas fuentes que ocupa ETESAL (ver referencia [7]) para registrar dichos datos. Esta información, fue analizada desde el 1 de abril hasta el 1 de diciembre de 2003.

En las figuras 1.7, se muestran el comportamiento de las descargas que han sucedido en varios meses del año 2003 y que fueron capturados por la NASA, ver referencia [3].

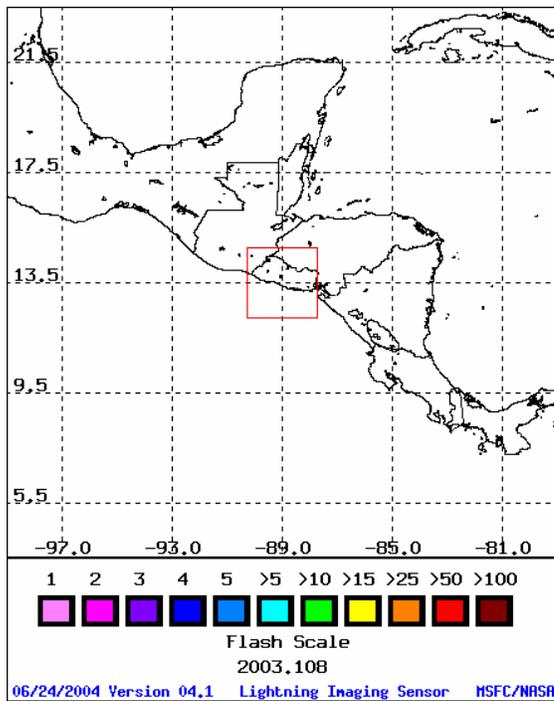


Figura 1.7.a. 18 de Abril

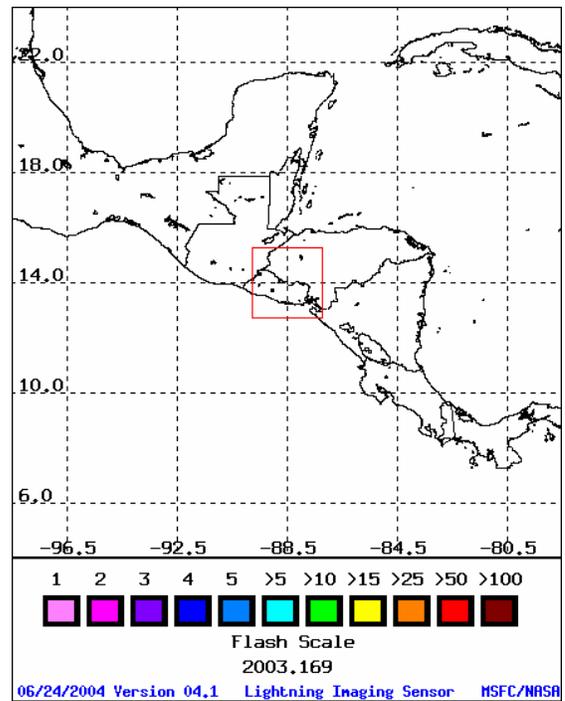


Figura 1.7.b. 18 de Junio

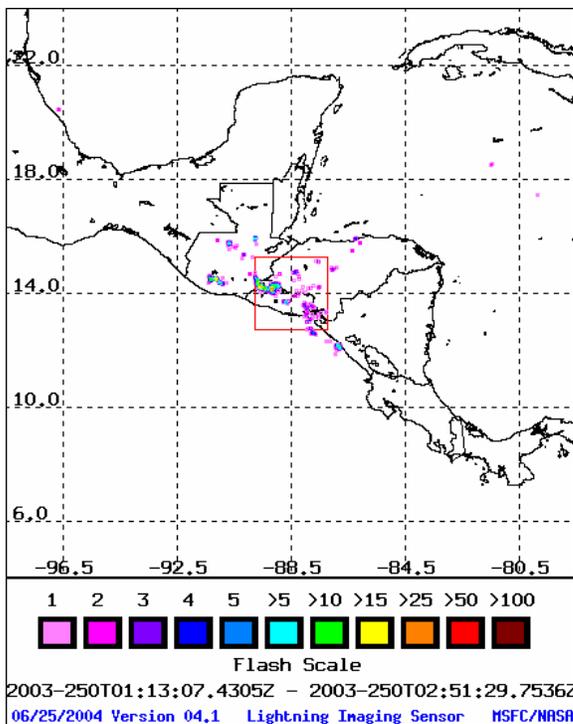


Figura 1.7.c. 7 de Septiembre

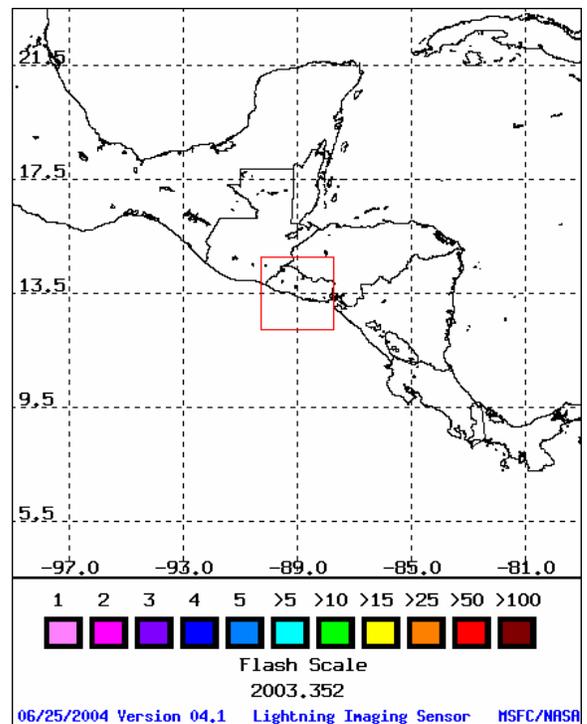


Figura 1.7.d. 18 de Diciembre

La información obtenida de las figuras 1.7 se descargó en la tabla 1.1, el método fue el siguiente:

1. Enmarcar la zona comprendida para Salvador de la manera más aproximada.
2. Contar la cantidad de descargas que quedaron en marcadas por la zona y las que abarquen solo para El Salvador.
3. Repetir este procedimiento para cada día del año.

En la figura 1.8, se muestra parte de la información que resulta al enmarcar la zona que comprende a El Salvador.

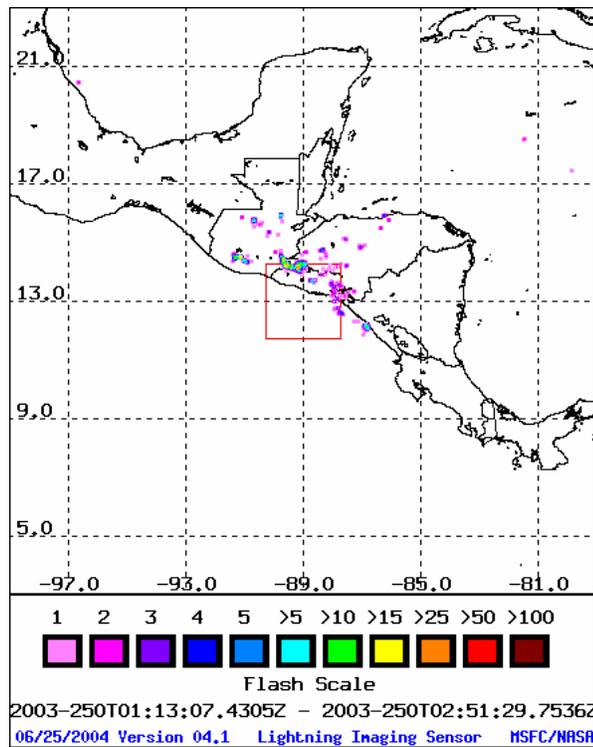


Figura 1.8. Información para el día 7 de Septiembre.

Tabla 1.1. Información obtenida de las distintas fuentes.

Cantidad de rayos caídos por mes durante el año 2003												
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Día												
1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	4	1	0	0	2	0	0	0
3	0	0	0	0	50	7	0	2	18	1	0	0
4	0	0	0	0	0	1	1	5	2	10	0	0
5	0	0	0	0	109	1	2	5	0	12	0	0
6	0	0	0	0	71	0	0	2	5	2	0	0
7	0	0	0	0	0	0	2	13	197	1	25	0
8	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0
9	0	0	0	0	1	57	0	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0	0	4	61	33	0	2	0
11	0	0	0	0	0	1	0	1	0	23	8	0
12	0	0	0	1	2	10	1	1	0	0	0	0
13	0	0	0	1	9	1	13	0	9	3	0	0
14	0	0	0	0	1	1	20	4	7	10	0	0
15	0	0	17	0	0	0	4	2	3	3	0	0
16	0	0	0	0	0	0	6	0	29	0	0	0
17	0	0	0	0	0	0	0	0	45	43	7	0
18	0	0	0	0	28	0	0	1	3	10	0	0
19	0	0	0	0	1	1	0	0	3	2	0	0
20	0	0	0	0	0	2	0	0	3	0	0	0
21	0	0	0	0	0	1	0	0	1	12	0	0
22	0	0	0	0	1	1	0	0	1	0	0	0
23	0	0	0	0	11	19	3	0	6	0	0	0
24	0	0	0	0	0	9	53	0	26	0	0	0
25	0	1	8	0	1	0	3	1	0	0	0	0
26	0	0	2	0	3	25	3	0	0	0	0	0
27	0	0	0	0	2	5	40	2	17	11	0	0
28	0	0	0	34	0	1	0	1	0	0	0	0
29	0		4	93	7	0	0	2	0	0	0	0
30	0		0	0	7	0	3	34	57	0	0	0
31	0		0		2		7	21		0		0
Días/Rayo	0	1	4	4	18	19	17	17	20	15	4	0
Rayos/Mes	0	1	31	129	310	145	166	158	467	144	42	0

Con toda esta información y aplicando la EC. 10 obtenemos la siguiente información:

$$T_d = 119 \text{ días/rayo}$$

$$N_g = 0.04 \cdot (119)^{1.25} \text{ lo cual da: } N_g = 15.72 \text{ Descargas/Km}^2\text{-Año}$$

## CONCLUSIONES DEL CAPITULO I.

El estudio de la coordinación de aislamiento abarca muchos aspectos que se toman en cuenta a la hora de diseñar líneas de distribución y los efectos que sobretensiones sobre las mismas.

Las sobretensiones pueden ser de varios tipos siendo las más comunes las de origen atmosférico como lo son las descargas directas e indirectas sobre las líneas, el otro tipo resulta sobre las maniobras que se realizan en las subestaciones que están a disposición sobre las distribuidoras.

Por otra parte los fenómenos que afectan, pueden ser como la resonancia y ferroresonancia que son particulares del tipo de sistema que se tenga instalado.

El estudio abarca un análisis de los puntos más vulnerables sobre las descargas atmosféricas, esto con el fin de diseñar un sistema para cada ubicación; puesto que los puntos con menos incidencias de descargas atmosféricas no se desarrollaran alternativas como en el caso de donde la incidencia sea de mayor índole. En esta parte el diseño radica en el estudio y comportamiento de los cables de guarda, como una alternativa de mayor viabilidad.

Asimismo se realiza un estudio bajo varias fuentes sobre la cantidad de descargas atmosféricas caídas en El Salvador, con el fin de evaluar y dejar de una forma actualizada datos que se han corroborado de acuerdo a investigación y recopilación de información ocupando las herramientas que se tenían a disposición.

## REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- [1] Insulation Coordination. Part 1: Definitions, Principles and Rules. 1993
- [2] CIGRE Working Group 01 (Lightning) of Study Committee 33 (Overvoltages and Insulation Coordination), "Guide to procedures for estimating the lightning performance of transmission lines," CIGRE Brochure 63, 1991.
- [3] <http://thunder.nsstc.nasa.gov/data/lisbrowse.html>
- [4] CARACTERISTICAS PRINCIPALES DEL PROCESO DE DESCARGA DE UN RAYO.  
<http://www.attractor.com.ar/paginas/carac%20desc%20rayo.htm>
- [5] TESIS DOCTORAL: Evaluación estadística del comportamiento de líneas aéreas de distribución frente a sobretensiones de origen externo. Ing. Francisco A. Martines Velasco. UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA, DEPARTAMENT D'ENGINYERIA ELÈCTRICA. Barcelona, 2001.
- [6] Boletín N°13, CONSIDERACIONES SOBRE EL COMPORTAMIENTO DE LAS LÍNEAS DE DISTRIBUCIÓN ANTE DESCARGAS ATMOSFÉRICAS; Ingeniero Jaime Blandón Díaz, Electroporcelana GAMMA S.A. Empresa de la Organización Corona. Colombia.
- [7] Relatorio y libro de registros de ETESAL S.A. de C.V.
- [8] Amendment to IEEE Standard Techniques for High-Voltage Testing. IEEE Std 4a-2001.
- [9] Cuaderno Técnico No 190. La ferroresonancia. Schneider Electric.

## CAPITULO II

### GENERADOR DE IMPULSOS DEFINICIONES DE TERMINOS DE APLICACIÓN E INSTALACIONES DE SEGURIDAD DE LABORATORIO DE LA PRUEBA DE IMPULSO

#### Introducción

En el presente capítulo se expondrá la teoría básica y definiciones de términos de aplicación a pruebas dieléctricas con voltajes de impulsos de rayo y de maniobra o conmutación necesaria para poder entender el funcionamiento del generador de impulsos de alto voltaje.

Se presenta además, un estudio de la onda de la prueba de impulso (de rayo y de conmutación), así como su variante (onda recortada), mostrándose los diferentes parámetros que caracterizan a todas estas formas de onda y las tolerancias correspondientes, ambas especificadas en los estándares ó normas<sup>1</sup>.

Aquí se considerará al generador formado por la estructura básica necesaria (generador DC y circuito de forma de onda) como compuesto de todas sus partes integrantes para poder analizarlo.

El estudio presentado toma en cuenta al generador considerándolo de una sola etapa, para el cual se presenta el análisis matemático para la deducción de la forma de onda de impulso característica. Prosiguiendo con la presentación de la forma de operación del generador de varias etapas.

Se presenta además las partes constituyentes de un laboratorio moderno de la prueba de impulso, con el objetivo que el lector conozca todos los elementos de que este tipo de laboratorio y la relación que sus partes integrantes podrían tener.

---

<sup>1</sup> Una es la referencia [1]: IEC 60-1 (Segunda edición 1989)

Se presentan criterios relacionados a los requerimientos de espacio y de seguridad en laboratorios de alta tensión, muy importantes en toda instalación de este tipo.

## 2.0 Definiciones generales

### 2.1 Impulso

Un impulso es un voltaje o una corriente transitoria intencionalmente aplicado, el cual crece rápidamente a un valor pico y entonces cae más despacio hasta cero. Tal impulso se representa generalmente por la suma de dos exponenciales, así:

$$V_o = KV_g (e^{-t/T_c} - e^{-t/T_f}) \quad \text{Ecu (2.1)}$$

Donde:

K: Eficiencia del circuito generador.

T<sub>c</sub>: Constante de tiempo de la cola del impulso,

T<sub>f</sub>: Constante de tiempo del frente del impulso.

V<sub>g</sub>: Voltaje de carga del generador multiplicado por el número de etapas.

El Término "Impulso " debe distinguirse de los términos "Sobrevoltaje" y "Sobrecorriente", los cuales se refieren a transitorios ocurridos en mallas o equipos en servicio.

#### 2.1.1 Impulso de tensión de rayo y de conmutación.

El impulso de tensión de rayo y de conmutación son los que simulan respectivamente las descargas atmosféricas y transitorias por maniobras internas en la red eléctrica.

Se consideran impulsos de tensión de rayo aquellos cuya duración del frente de la onda que los caracteriza está entre unas décimas a unas decenas de microsegundos. Y aquellas teniendo frentes de duración de unas decenas hasta unos miles de microsegundos se consideran como impulsos de conmutación o maniobra.

## **2.2 Características relacionadas a descargas disruptivas y voltajes de prueba**

### **2.2.1 Descarga disruptiva**

Este término se relaciona con el fenómeno asociado con la falla de un aislamiento bajo tensión eléctrica, en el cual la descarga atraviesa el aislamiento bajo prueba reduciendo el voltaje entre los electrodos a cero ó a un valor cercano. Se aplica a fallas de aislamiento en dieléctricos sólidos, líquidos y gaseosos y a combinaciones de estos.

El término flameo (sparkover y flashover), se utiliza cuando una descarga disruptiva ocurre en dieléctricos gaseosos o líquidos.

El término perforación es usado cuando las descargas disruptivas ocurren a través de dieléctricos sólidos.

### **2.2.2 Voltaje de descarga disruptiva**

Para voltajes de impulso recortados en el frente ó después de la cresta, el voltaje de descarga disruptiva es el valor del voltaje de prueba causante de la descarga disruptiva.

Para impulsos de voltaje recortados en el frente, el voltaje de descarga disruptiva se define como el voltaje al instante cuando ocurre la descarga disruptiva. Los voltajes de descarga disruptiva están sujetos a variaciones aleatorias y, usualmente debe hacerse un número de observaciones para tener un valor estadístico del voltaje.

### **2.2.3 Probabilidad de descarga disruptiva P**

Es la probabilidad de que cierto valor de voltaje esperado de una forma dada cause descarga disruptiva.

### **2.2.4 Probabilidad de resistencia**

Es la probabilidad de que un objeto resistirá a una aplicación de cierto voltaje y forma esperada. Si la descarga disruptiva tiene una probabilidad P, la probabilidad de resistencia es  $(1-P)$ .

### 2.2.5 Tensión o voltaje de resistencia

Es el voltaje que el equipo eléctrico es capaz de sostener sin falla ó descarga disruptiva.

### 2.2.6 Voltaje de descarga disruptiva asegurado

Es un voltaje especificado el cual caracteriza al aislamiento de un objeto con respecto a la prueba de descarga disruptiva.

### 2.2.7 Voltaje de descarga disruptiva de 50%

Es el valor de voltaje esperado el cual tiene una probabilidad de 50% de producir una descarga disruptiva.

Ver referencia [1] y [12], para mayor información sobre algunos conceptos.

## 2.3 La onda de la prueba de impulso

En general existen tres tipos de impulsos: impulsos de tensión atmosférica o de rayo (Lightning impulse), impulsos de conmutación o de maniobra (switching impulse) e impulsos de corriente (ver referencia [1] y [12]).

### 2.3.1 Onda de la prueba de impulso de rayo (lightning impulse)

Un impulso de rayo pleno es un impulso de tensión que no es interrumpido por una descarga disruptiva, ver figura 2.1, y como se definió anteriormente la diferencia entre impulso de rayo y un impulso de maniobra, se basa en la duración del frente de la onda.

Un impulso de rayo estándar es un impulso de onda plena, el cual posee un tiempo de frente virtual de  $1.2 \mu\text{s}$  y un tiempo de valor medio virtual de  $50 \mu\text{s}$ , por lo que comúnmente se le llama de  $1.2/50 \mu\text{s}$ . De acuerdo a estos estándares, una descarga de rayo se simula tal como se muestra en la figura 2.1

El valor del voltaje de prueba es para impulsos de tensión de rayo, el valor del voltaje de cresta como el de la figura 2.1. En algunos circuitos de prueba pueden ocurrir oscilaciones o excedentes (overshoot) en la cresta del impulso ver figura 2.2a-d; si las oscilaciones de tales frecuencias son mayor que 0,5 MHz o la duración del excedente (overshoot) no sobrepasa 1  $\mu\text{s}$  se puede dibujar una curva promedio, como en la figura 2.2a-d y para propósitos de medida la amplitud máxima de esta curva define el valor del voltaje de prueba. Los límites de amplitud permisible para las oscilaciones o el excedente para impulsos de rayo estándar se presentan mas adelante.

Para otras formas de impulso por ejemplo figura 2.2e-f, se define el valor del voltaje de prueba tomando en cuenta el tipo de prueba y el objeto bajo prueba.

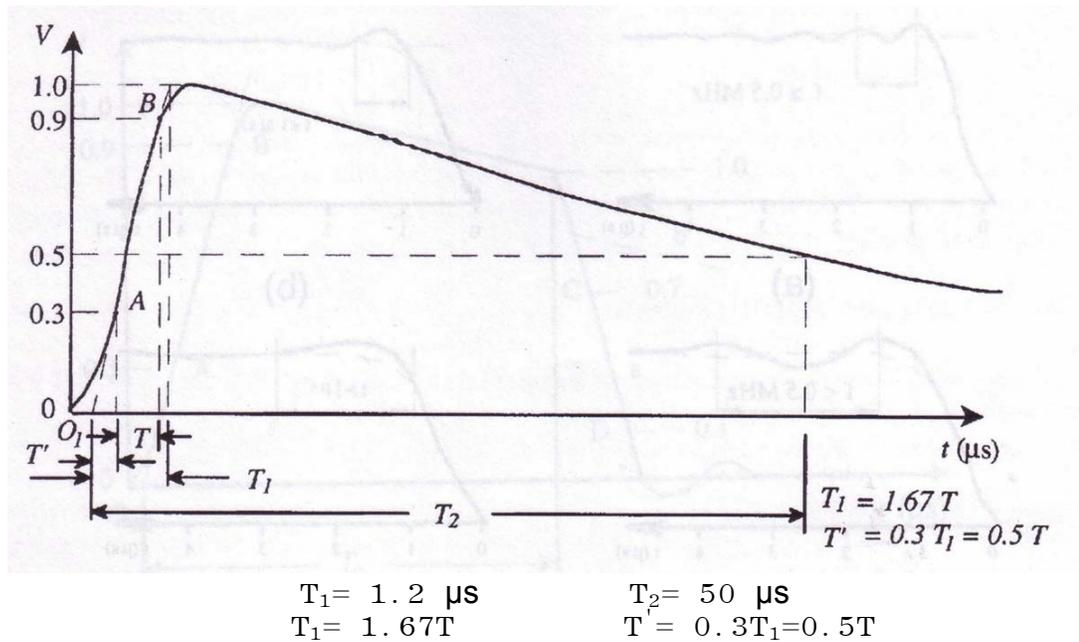


Figura 2.1. Impulso de rayo pleno

El tiempo virtual de frente (tiempo de frente)  $T_1$ , de un impulso de rayo como el de las figuras 2.1 y 2.3, se define como 1.67 veces el intervalo de tiempo  $T$  entre los instantes cuando el nivel del impulso esta entre el 30%, y el 90% del valor pico (puntos A y B). Si las oscilaciones se presentan en el frente de los puntos A y B, se debe tomar la curva promedio a través de estas oscilaciones.

El origen virtual  $O_1$  de un impulso de rayo es el instante precedido al punto A por un tiempo  $0.3 T_1$ , ver figura 2,1 y 2.4, Para oscilogramas teniendo un tiempo de barrido lineal, este es la intersección con el eje X de una línea recta dibujada a través del punto de referencia A hasta B en el frente de la onda.

El tiempo virtual de valor medio (tiempo de valor medio)  $T_2$  de un impulso de rayo es el intervalo de tiempo entre el origen virtual y el instante en la cola del impulso cuando el voltaje ha decrecido a la mitad del valor pico, ver figura 2,1.

Las siguientes tolerancias se aceptan, entre los valores especificados para impulsos de rayo estándar y aquellos registrados en forma experimental

Valor de cresta	$\pm 3\%$ .
Tiempo de frente	$\pm 30\%$ .
Tiempo de valor medio	$\pm 20\%$ .

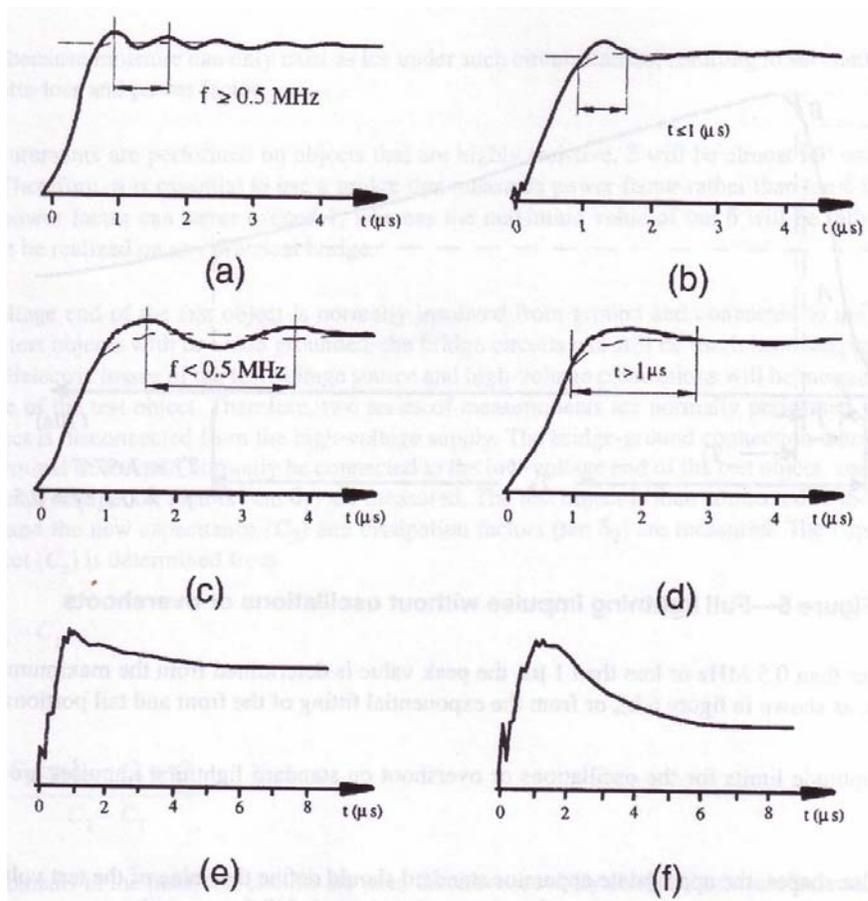


Figura 2.2. Ejemplos de impulsos de rayo con oscilaciones y overshoot.

- (a), (b)- El valor del voltaje de prueba se determina por la curva promedio (línea punteada).
- (c), (d)- El valor del voltaje de prueba es el valor de cresta
- (e), (f)- No existe una guía general para la determinación del voltaje de prueba.

Así, tomando en cuenta las tolerancias anteriores, se considerarán ondas estándar aquella que tengan un tiempo de frente comprendido entre  $0.84 \mu\text{s}$  y  $1.56 \mu\text{s}$ ; y un tiempo de cola comprendido entre  $40 \mu\text{s}$  y  $60 \mu\text{s}$ .

El juego de ondas estándar posibles es el siguiente:

- $0.84/40 \mu\text{s}$  a  $0.84/60 \mu\text{s}$
- $1.56/40 \mu\text{s}$  a  $1.56/60 \mu\text{s}$

Los overshoot y oscilaciones en la vecindad del valor pico o cresta presentan las siguientes tolerancias:

- La amplitud de los picos debe ser menor del 5%, del valor de cresta.
- Las oscilaciones en la primera parte del impulso (abajo del 50%, del valor de cresta) son toleradas sí la amplitud de sus picos no excede del 25%, del valor de cresta.

### 2.3.2 Onda de la prueba de impulso de rayo recortado

Un impulso de rayo recortado es un impulso de rayo que repentinamente se interrumpe por una descarga disruptiva, causando un colapso en forma rápida prácticamente haciendo llegar el valor de voltaje en ese momento hasta cero. El colapso puede llevarse a cabo por medio de un explosor de esferas, o puede ocurrir en el aislamiento interno o externo del objeto bajo prueba y puede ocurrir en el frente o en la cola del impulso, ver figura 2.3 y 2.4.

Un impulso de rayo recortado es un impulso estándar el cual es recortado por los medios ya mencionados, después de dos a cinco microsegundos. Debido a dificultades prácticas en la medida, la duración virtual del colapso de voltaje no ha podido ser estandarizada.

El recorte se caracteriza por una discontinuidad inicial, decrementando el voltaje hasta cero con o sin oscilaciones, Ver figura 2.3 y 2.4.

En una onda recortada, el instante del recorte es el instante cuando ocurre la discontinuidad inicial. Y el voltaje al instante del recorte es el voltaje al instante de la discontinuidad. El tiempo de recorte ( $T_c$ ), es el intervalo de tiempo entre el origen virtual y el instante del recorte.

Las características del colapso de voltaje durante el recorte se definen en términos de los puntos C y D que corresponden al 70% y 10% respectivamente del voltaje al instante del recorte, ver figura 2.3 y 2.4. La duración virtual del colapso de voltaje es 1.67 veces el intervalo de tiempo entre los puntos C y D. La inclinación virtual del colapso de voltaje es la razón del voltaje en el instante del recorte, a la duración virtual del colapso de voltaje.

Una elevación de voltaje con una inclinación aproximadamente constante, hasta que es recortada por una descarga disruptiva, se describe como un impulso recortado de elevación de frente lineal. Para definir tal impulso, se dibuja la mejor línea recta ajustada a través del frente del impulso entre el 50% y el 90% de la amplitud al instante del recorte. La intersección de esta línea con las amplitudes de 50% y 90% son designadas como E y F respectivamente, ver figura 2.5.

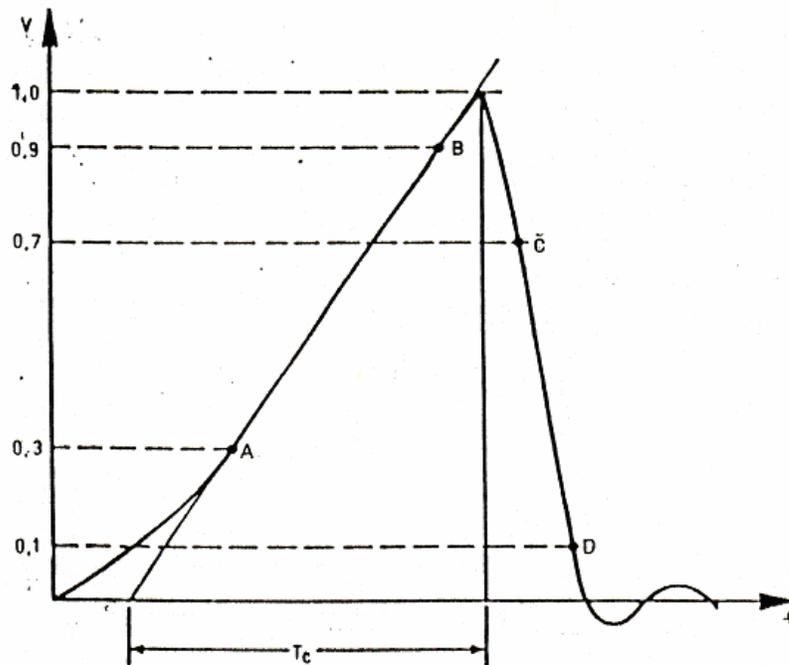


Figura 2.3. Impulso de rayo recortado en el frente.  
 $T_c$ : Tiempo de recorte

El impulso de rayo recortado en el frente queda bien definido por los siguientes términos:

- El voltaje al instante del recorte.
- El tiempo de subida ( $T_r$ ). Es el intervalo de tiempo entre E y F multiplicado por 2.5, ver figura 2.5.
- La inclinación virtual S. Esta es la pendiente de la línea recta definida por los puntos E y F, como se muestra en la figura 2.5.

El impulso se considera aproximadamente lineal si el frente desde el 50% de amplitud hasta el instante del recorte, se cierra completamente entre dos líneas paralelas a la línea E - F, pero desplazadas en tiempo en  $0.05 T_r$ .

El voltaje de rompimiento del aislamiento, o el voltaje de flameo o de chispeo de un explosor, particularmente el último, varía con la magnitud del tiempo de voltaje aplicado. Las curvas que describen el comportamiento anterior, son llamadas curvas de voltaje - tiempo, y es un gráfico del voltaje de flameo de cresta plotado contra su tiempo correspondiente para una serie de impulsos aplicados.

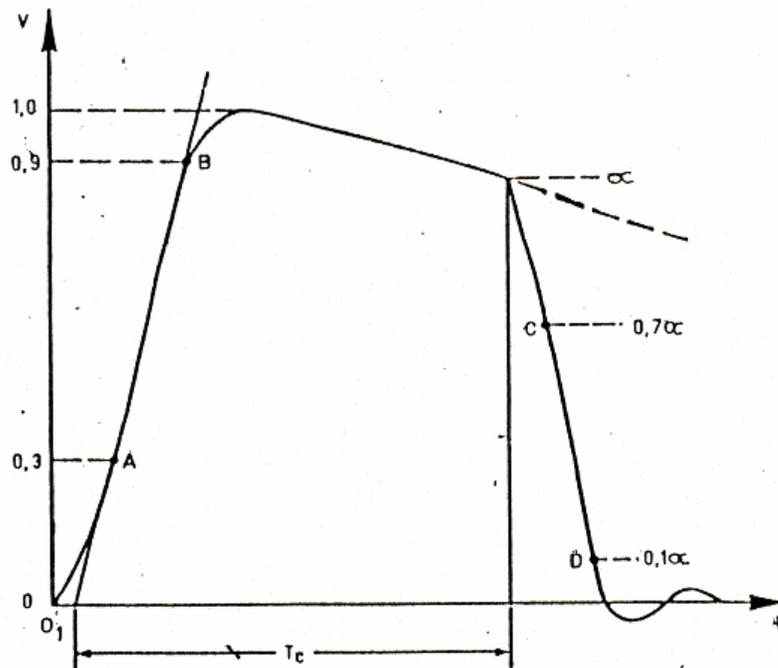


Figura 2.4. Impulso de rayo recortado en la cola.  
 $T_c$ : Tiempo de recorte

Para mayor información ver referencia [1] y [12]

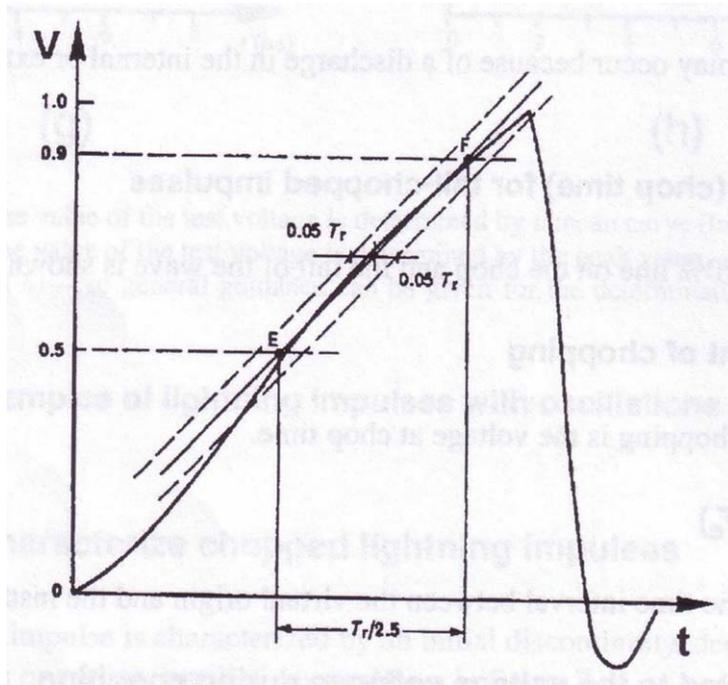


Figura 2.5. Impulso recortado de frente de subida lineal.

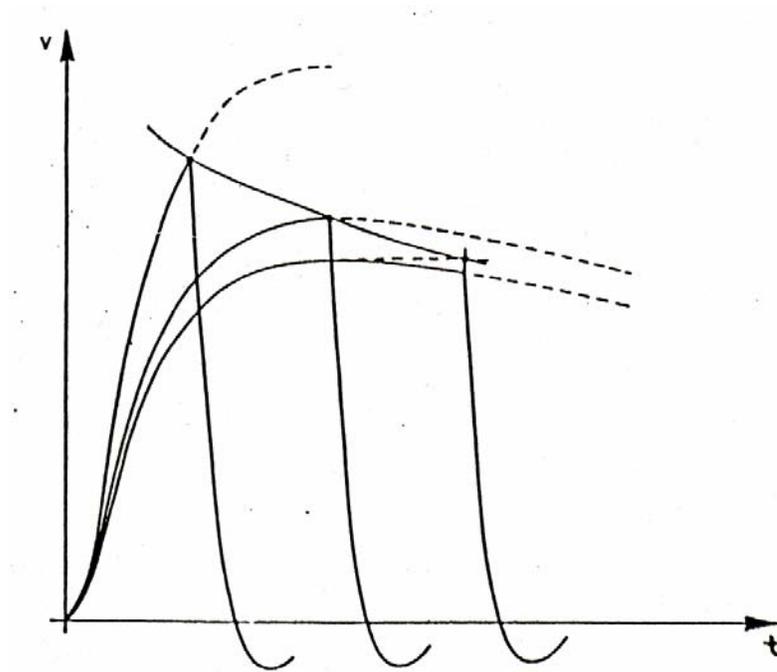


Figura 2.6. Curva voltaje / tiempo para impulsos de forma esparada constante.

La curva de voltaje-tiempo para impulsos de subida lineal, es la curva que relaciona el voltaje al instante del recorte, al tiempo de subida  $T_r$ . La curva es obtenida por medio de la aplicación de impulsos con aproximadamente frentes lineales de diferentes inclinaciones.

La curva de voltaje-tiempo para impulsos de forma esperada constante, es la curva que relaciona el voltaje de descarga disruptiva de un objeto de prueba con el tiempo de recorte, el cual puede ocurrir en el frente, en la cresta, o en la cola del impulso. Esta curva la podemos obtener cuando aplicamos impulsos de voltaje de forma constante, pero con diferentes valores picos, ver figura 2.6.

### 2.3.3 La onda de impulso de conmutación o de maniobra

Las características de una onda impulso de maniobra o conmutación se expresan por los parámetros que veremos a continuación, y que se distingue de la prueba impulso de rayo en base al tiempo de frente, como se dijo anteriormente, y cuya ilustración se ve en la figura 2.7.

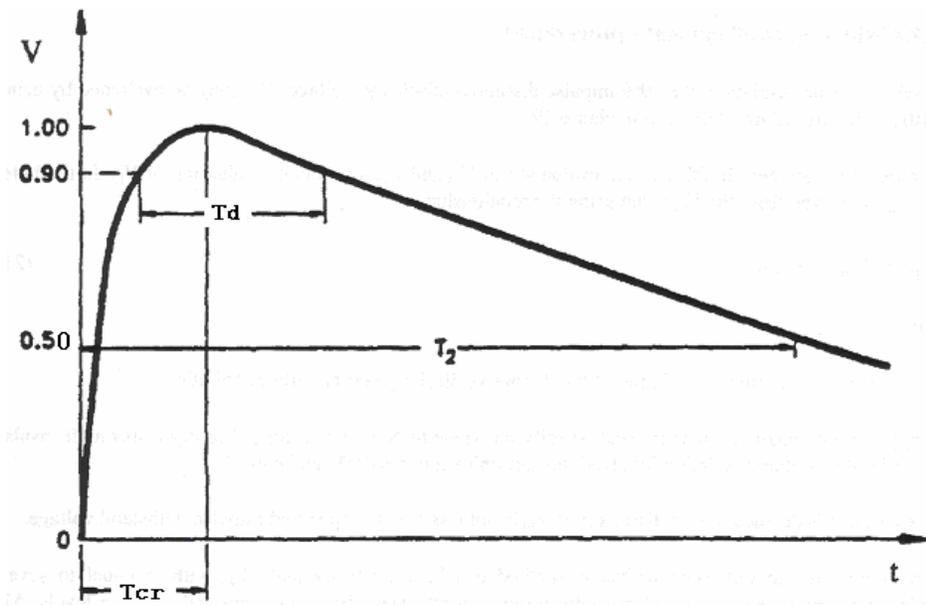


Figura 2.7. Impulso de conmutación plena

El valor del voltaje de prueba es el valor pico esperado.

El tiempo de cresta ( $T_{cr}$ ), es aquel intervalo de tiempo entre el origen actual y el instante cuando el voltaje alcanza su máximo valor.

El tiempo virtual de valor medio  $T_2$ , para un impulso de maniobra, es el intervalo de tiempo entre el origen actual y el instante en la cola cuando el voltaje de impulso ha decaído a la mitad de su valor pico.

El tiempo arriba del 90%, ( $T_d$ ), es el intervalo de tiempo durante el cual el voltaje impulso excede el 90% del valor pico.

El tiempo de recorte ( $T_c$ ), para un impulso de conmutación, es el intervalo de tiempo entre el origen actual y el instante del recorte,

El impulso recortado con frente de subida lineal, es un término aplicable a ambas pruebas de impulso (de rayo y de maniobra), el cual fue definido anteriormente.

El impulso de maniobra estándar es un impulso que tiene un tiempo de cresta  $T_{cr}$  de 250  $\mu s$ , y un tiempo de valor medio  $T_2$  de 2500  $\mu s$ , se describe como un impulso de 250/2500  $\mu s$ .

Las tolerancias permitidas entre el valor experimental y el valor especificado, para impulsos estándar e impulsos especiales, son:

- Valor de cresta  $\pm 30\%$ .
- Tiempo de cresta  $\pm 20\%$ .
- Tiempo de valor medio  $\pm 60\%$

Así, tomando en cuenta las tolerancias anteriores, se considerarán ondas estándar aquellas que tengan un tiempo de cresta comprendido entre 200  $\mu s$  y 300  $\mu s$ ; y un tiempo de valor medio comprendido entre 1000  $\mu s$  y 4000  $\mu s$ . El juego de ondas estándar posibles es el siguiente:

- 200/1000  $\mu s$  a 200/4000  $\mu s$
- 300/1000  $\mu s$  a 300/4000  $\mu s$

La generación del voltaje de prueba para impulsos de conmutación se realiza con un generador de impulsos como se hace para los impulsos de rayo. Los impulsos de conmutación pueden también ser generados por medio de la aplicación de un impulso de voltaje al devanado de baja tensión de un transformador de prueba (o un transformador a ser probado). Más adelante se mostrará esta forma de generación<sup>2</sup>.

---

<sup>2</sup> Ver sección 2.14.0

La medida del voltaje de prueba y la determinación de la forma del impulso puede ser descrita como se mencionó para impulsos de rayo. Para información adicional relativa a la prueba impulso ver referencia [1] y [12]

## **2.4 Requerimientos generales a los procedimientos y objetos de prueba**

### **2.4.1 Arreglo general del objeto de prueba**

Cuando una prueba se lleva a cabo, el objeto de prueba debe estar completo en todos sus detalles esenciales y debería ser procesado de una manera normal para equipos similares (por ejemplo impregnación en vacío y tratamiento térmico).

Las características de la descarga disruptiva de un objeto bajo prueba pueden estar afectadas por su arreglo general por ejemplo su disposición con respecto a estructuras cercanas, su altura desde el nivel del suelo, el arreglo de los cables de alta tensión. Una distancia despejada de estructuras cercanas de 1.5 veces la longitud de la posible trayectoria de descarga más corta, en el objeto de prueba, usualmente hace que tal efecto de proximidad sea insignificante. Se requieren distancias despejadas más grandes en los casos de pruebas de impulsos de conmutación o en pruebas, a voltajes muy altos, para evitar descargas a estructuras extrañas. En pruebas húmedas o en pruebas con contaminación o donde el voltaje de distribución en el objeto de prueba es suficientemente independiente de influencias externas, pueden aceptarse zonas despejadas más pequeñas consiguiendo que las descargas no ocurran a estructuras extrañas.

### **2.4.2 Pruebas húmedas**

El método de pruebas húmedas descrito adelante tiene como finalidad simular el efecto de la lluvia natural en aislamiento externo y contiene mejoras a métodos previos. Se recomienda para pruebas con todos los tipos de voltajes de prueba, y para todo tipo de aparatos diseñados para uso al aire libre.

### 2.4.3 Pruebas Secas

El objeto de prueba debe estar seco y limpio. Si no se especifica lo contrario por los estándares de los aparatos, la prueba debe ser hecha a temperatura ambiente, y los procedimientos para la aplicación del voltaje se verá en secciones posteriores.

### 2.4.4 Procedimiento de pruebas húmedas

El objeto de prueba debe ser rociado con agua de resistividad prescrita, cayendo sobre el coma gotas (droplets), y dirigidas de manera que las componentes vertical y horizontal de la intensidad de rociado, sean aproximadamente iguales. Estas intensidades son medidas con un recipiente colector graduado, teniendo aberturas de 100 a 750 cm<sup>2</sup>. Una de estas aberturas es vertical, la otra es horizontal, la vertical recibe el rociado. Otra práctica menos exacta es medir solamente la componente vertical y juzgar por el ojo que el rociado está cayendo a un ángulo aproximadamente de 45°.

El recipiente colector debe estar colocado cerca del objeto de prueba, pero evitando que este sea rociado por las gotas provenientes de él. Durante el período de medida, el colector debe moverse despacio sobre un área suficiente para que resulte por promedio el efecto de irregularidades en el roseado de atomizadores individuales.

En el caso de objetos de prueba con alturas superiores a 1 mt, tales medidas deben hacerse cerca de la cima, el centro y al pie del objeto. Un procedimiento similar debe utilizarse para objetos de prueba con grandes dimensiones horizontales.

El aparato para rociar debe ser ajustado para producir, dentro de las tolerancias especificadas, condiciones de precipitación al objeto de prueba dadas en la tabla 2.1. Cualquier tipo de arreglo de las boquillas de salida del agua (toberas)<sup>3</sup>, que cumpla con los requerimientos de la tabla 2.1 puede ser utilizada.

Distancias de rociado más grande se pueden obtener si las toberas son dirigidas hacia arriba a un ángulo de alrededor de 15 a 25 grados con la horizontal. Hay que notar que si la presión del agua se incrementa arriba de los límites recomendados, los chorros de agua pueden romper prematuramente la tobera y causar un rociado insatisfactorio

---

<sup>3</sup> Ver referencia [1] para mayor información

al objeto de prueba.

El objeto de prueba debe ser inicialmente prehumedecido por al menos 15 minutos bajo las condiciones especificadas en la tabla 2.1, y estas condiciones deberían mantenerse dentro de las tolerancias especificadas a través de la prueba. El tiempo de prehumedecimiento puede incluir el tiempo necesario para ajustar el rociado.

Tabla 2.1. Características de las toberas consideradas

Tipo de tobera	Diámetro del orificio (mm)	Longitud del chorro de agua (m)
I y II	0.5	4
	0.8	6
	1.0	10
III	1.0	9 - 11

Tabla 2.2. Condiciones de precipitación

Razón de precipitación para todas las medidas	Unidades	
Componente vertical	mm/min	1.0 a 1.5
Componente horizontal	mm/min	1.0 a 1.5
Limite para cualquier medida y para cada componente	mm/min	0.5 a 2.0
Temperatura del agua colectada a 20°C	°C	± 15
Resistividad del agua a 20°C	Ω m	100 ± 15

## 2.5. Condiciones atmosféricas

### 2.5.1 Factores de corrección atmosférica

El voltaje de descarga disruptiva del aislamiento externo depende de las condiciones, atmosféricas prevalecientes.

Usualmente el voltaje de flameo para una trayectoria dada en el aire varía al darse un cambio en la densidad o humedad del aire.

Sin embargo, cuando la humedad relativa excede alrededor del 80%, el voltaje de flameo se vuelve irregular, especialmente cuando el flameo ocurre a través de una superficie aislante.

Por medio de la aplicación de factores correctivos, una medida del voltaje de flameo o chispeo puede ser convertida al valor que habría sido obtenido bajo condiciones atmosféricas de referencia. Inversamente, un voltaje de prueba especificado para condiciones de referencia puede ser convertido al valor equivalente bajo condiciones de prueba prevalecientes.

Existen dos tipos de factores de corrección:

El factor de corrección de la densidad del aire ( $K_d$ ).

El factor de corrección de la humedad del aire ( $K_h$ ).

El voltaje de descarga disruptiva es proporcional a  $K_d / K_h$ . Si no se especifica de otra manera, el voltaje aplicado durante una prueba de tensión crítica de flameo, sobre un aislamiento externo, se determina por la multiplicación del voltaje de flameo especificado por  $(K_d/K_h)$ .

Similarmente, los voltajes de flameo encontrados al realizar la prueba son corregidos a aquellos aplicables para atmósferas estándar de referencia dividiéndolo por  $(K_d/K_h)$ , o lo que es lo mismo multiplicándolo por  $K_h / K_d$ .

El procedimiento de corrección descrito anteriormente, también es aplicable cuando se realizan pruebas de voltaje de resistencia. Es decir el voltaje que se aplicará en la prueba se obtiene al multiplicar el voltaje de resistencia especificado por  $(K_d/K_h)$ ; y un voltaje de resistencia encontrado en la prueba se convierte a condiciones estándar al dividirlo entre  $(K_d/K_h)$  o bien multiplicarlo por  $(K_h/K_d)$ . En los reportes de pruebas siempre debería incluirse las condiciones atmosféricas actuales durante la prueba y se debe indicar si se han aplicado factores de corrección o no.

### 2.5.2 Condiciones atmosféricas estándar

Las condiciones atmosféricas estándar de referencia son:

- Temperatura ( $t_o$ ) = 20 °C
- Presión ( $P_o$ ) = 101,3 Kpa (760 mmHg)
- Humedad ( $h_o$ ) = 11 g de vapor de agua por m<sup>3</sup>.

Para información adicional relativa a las condiciones atmosféricas y factores de corrección se puede consultar la referencia [1] y [12].

### 2.5.3 Factores de corrección para la humedad y la densidad del aire

El factor de corrección para la densidad del aire ( $K_d$ ), viene dado por:

$$K_d = \left[ \frac{P}{P_o} \right]^m \times \left[ \frac{373 + t_o}{273 + t} \right]^n \quad \text{Ecu (2.2)}$$

Donde:

P: Presión atmosférica bajo condiciones de prueba

t: Temperatura en °C bajo condiciones de prueba

De manera similar, el factor de corrección para la humedad es:

$$K_h = (K)^w \quad \text{Ecu (2.3)}$$

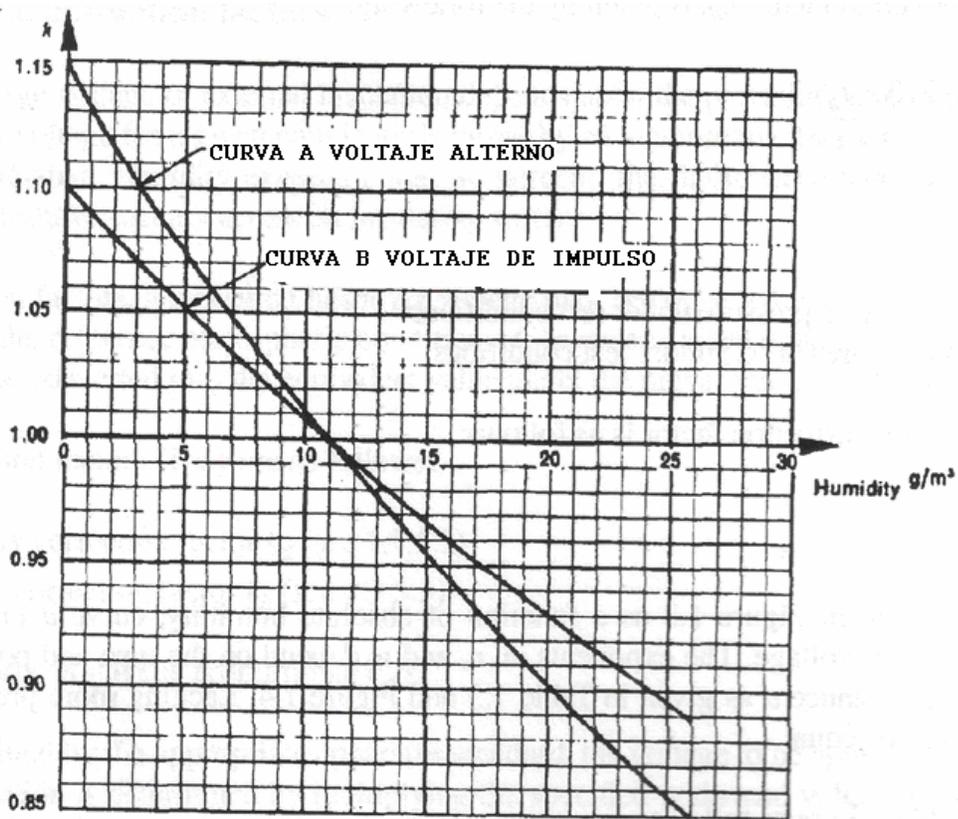


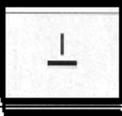
Figura 2.8. Factor de corrección K para la humedad como función de la humedad absoluta.

La constante K se obtiene de la figura 2.8, como una función de la humedad absoluta, donde se ocupa la curva (A) o (B) dependiendo del tipo de voltaje, para nosotros la curva de interés es la (B). Los exponentes m,n,w dependen del tipo polaridad del voltaje y de la distancia de chispeo o de flameo (d), como se muestra en la tabla 2.3 y figura 2.9.

Si se carece de información mas precisa, m y n se asumen igual. Para pruebas húmedas el factor de corrección de la densidad del aire debe aplicarse, pero no el factor de corrección de la humedad.

Para mayor información ver referencia [12]

Tabla 2.3 Aplicación de los factores de corrección

Tipo de voltaje de prueba	Forma del electrodo	Polaridad	Densidad del aire	La humedad	Exponente	
			Exponentes m y n	Factor k	w	
Voltaje de impulso de rayo		+	1.0	Ver figura 2.8 curva B	0	
		+			0	
	+	1.0				
Voltaje de impulso de maniobra		-	Ver figura 2.9	Ver figura 2.8 curva B	0	
		+			Ver figura 2.9	Ver figura 2.9
		+				

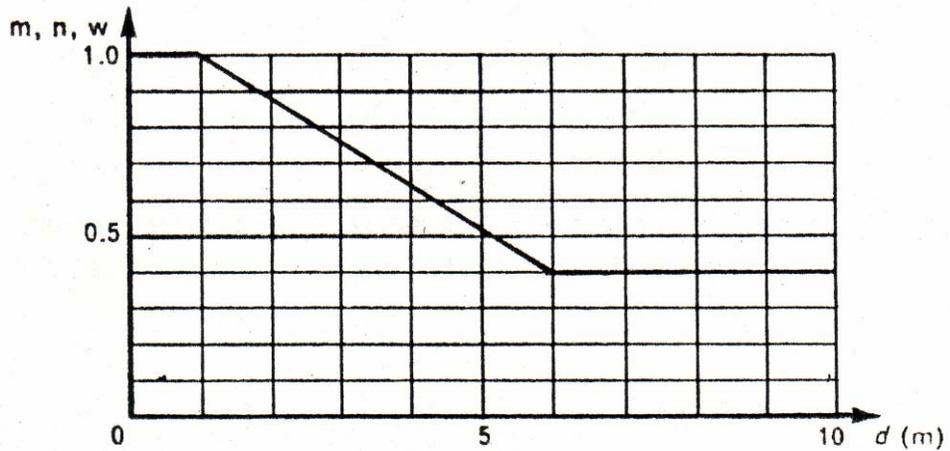


Figura 2.9. Valores de los exponentes m, n y w.

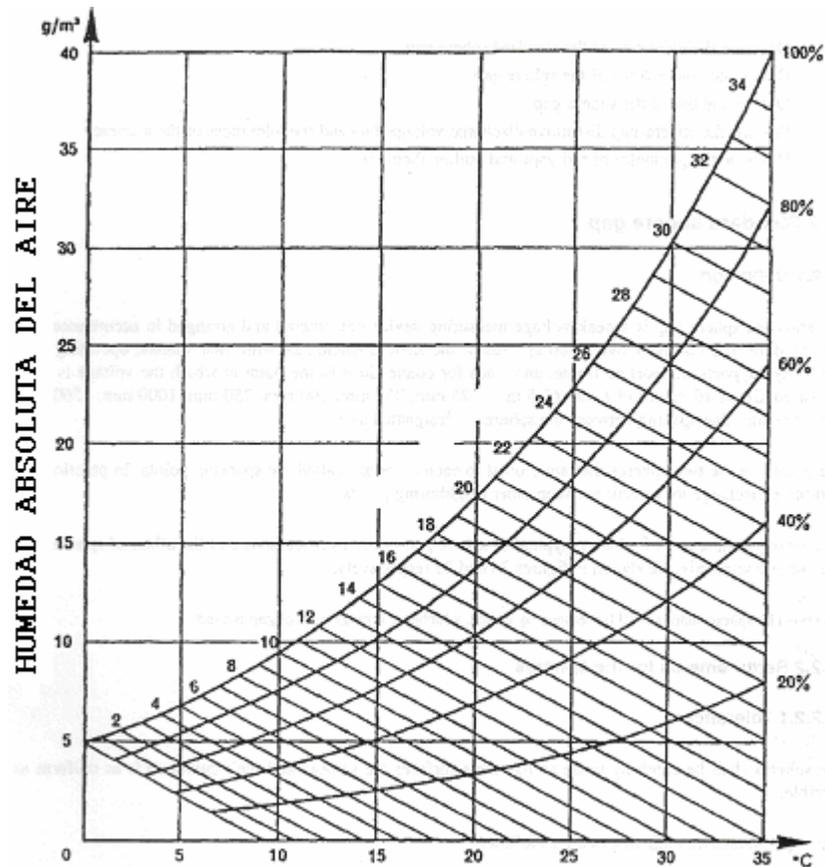


Figura 2.10. Humedad absoluta y relativa del aire como función de la lectura de dos termómetros de bulbo, uno seco y uno húmedo.

#### 2.5.4 Medida de la humedad

La medida de la humedad es usualmente hecha por medio de un higrómetro consistente de dos termómetros de precisión ventilados, uno estando seco y otro humedecido. La humedad absoluta como una medida de la lectura de los dos termómetros se determina por medio de la figura 2.10, la cual también permite la determinación de la humedad relativa. Es importante proveer un flujo de aire adecuado (4-10 m/s) para alcanzar valores de estado estable de las lecturas y para leer los termómetros cuidadosamente, con el fin de evitar errores excesivos en la determinación de la humedad.

## 2.6 Nivel básico de aislamiento al impulso de rayo

La prueba de impulso comúnmente utilizada consiste en la aplicación de la onda completa de sobrevoltaje de 1.2/50  $\mu$ s teniendo esta un valor especificado de voltaje de cresta para el aislamiento del equipo involucrado.

El nivel básico de aislamiento al impulso de rayo, BIL (Basic Lightning Impulse Insulation Level), es el valor del voltaje de cresta de la onda completa de voltaje que el aislamiento del equipo bajo prueba debe ser capaz de soportar.

El BIL puede ser ya sea un BIL estadístico o un BIL convencional.

El BIL *estadístico* es aplicable sólo para los aislamientos autorecuperables, mientras que el BIL convencional es aplicable para aislamientos no autorecuperables. Este BIL es universalmente para las condiciones secas.

El *BIL estadístico* es el valor de cresta del impulso estándar de rayo para el cual el aislamiento exhibe una probabilidad de 90 % de resistir, una probabilidad de 10 % de fracaso.

El BIL *convencional* es el valor de cresta de un impulso estándar de rayo para el cual el aislamiento no exhibe descarga destructiva cuando es sometido para un número específico de aplicaciones de este impulso.

Para simplificar el diseño y aplicación de equipo eléctrico el Instituto de Ingenieros en electricidad y Electrónica (IEEE). La Asociación Nacional de Fabricantes Eléctricos (NEMA) y El Instituto Eléctrico Edison (EEI) han establecido una serie de niveles básicos de aislamiento con referencia al impulso estándar. Estos se listan en la tabla 2.4. Fue así establecido que los niveles de impulso para algún equipo deberían tomarse de esta serie de valores estándar. Esto generalmente se ha cumplido, pero en algunos casos el valor adoptado de aislamiento no corresponde con su valor de voltaje de referencia dado en la tabla 2.4.

El BIL estándar de la mayoría de equipo de distribución de potencia cuya clase de aislamiento es de 23 Kv o mayor es el valor designado a la clase de referencia correspondiente como se muestra en la tabla 2.5. Esto es valido para transformadores inmersos en aceite, inductores inmersos en aceite, reguladores de voltaje, reactores inmersos en aceite, transformadores de instrumentación, bushing de aparatos, switches de aire y barras. Sin embargo bajo condiciones especiales puede construirse equipo que tiene un

BIL menor, este tipo de equipo es conocido como de aislamiento reducido, y el que tiene un BIL de acuerdo a las tablas es llamado de aislamiento pleno.

Los niveles de impulso de circuit breakers de potencia, montajes de aparatos de desconexión para varios voltajes, se muestran en la tabla 2.4.

Tabla 2.4. BIL correspondiente a diferentes voltajes del sistema.

VOLTAJE NOMINAL (KV)	BIL (KV)	VOLTAJE NOMINAL (KV)	BIL (KV)
2.4	45	46	250
4.16	60	67	350
7.2	75	92	450
13.8	95	115	550
14.4	110	138	650
23.0	150	161	750
34.5	200	230	900

El BIL estándar para transformadores tipo seco con su clase de aislamiento se muestra en la tabla 4.13, capítulo IV

Tabla 2.5. Niveles básicos de aislamiento al impulso (BIL)

CLASE DE AISLAMIENTO (KV)	BIL (KV)	CLASE DE AISLAMIENTO (KV)	BIL (KV)
1.2	30	69	350
2.5	45	92	450
5.0	60	115	550
8.7	75	138	650
15.0	95	161	750
23.0	150	196	900
34.5	200	230	1050
46	250	287	1300
		345	1550

## 2.7 Nivel básico de aislamiento al impulso de conmutación

La prueba impulso de conmutación comúnmente utilizada consiste en la aplicación de la onda completa de sobrevoltaje de 250/2500  $\mu\text{s}$  teniendo esta un valor especificado de voltaje de cresta para el aislamiento del equipo involucrado.

El nivel básico de aislamiento al impulso de conmutación, BSL (Basic Switching Impulse Insulation Level), es el valor del voltaje de cresta de la onda completa de voltaje que el aislamiento del equipo bajo prueba debe ser capaz de soportar.

El BSL puede ser ya sea un BSL estadístico o un BSL convencional.

El BSL *estadístico* es aplicable sólo para los aislamientos autorecuperables, mientras que el BSL convencional es aplicable para aislamientos no autorecuperables. Este BSL es universalmente para las condiciones húmedas.

El BSL *estadístico* es el valor de cresta del impulso estándar de conmutación para el cual el aislamiento exhibe una probabilidad de 90 % de resistir, una probabilidad de 10 % de fracaso.

El BSL *convencional* es el valor de cresta de un impulso estándar de conmutación para el cual el aislamiento no exhibe descarga destructiva cuando es sometido para un número específico de aplicaciones de este impulso.

## 2.8 EL GENERADOR DE IMPULSOS

### 2.8.1 Principio de operación

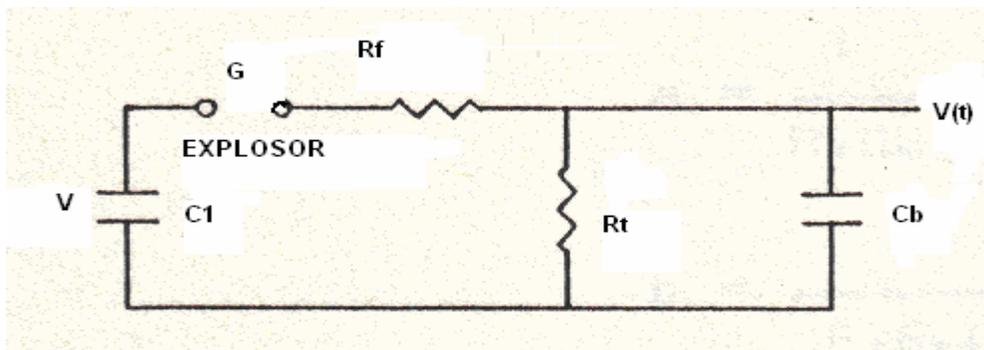
Un voltaje de impulso es un voltaje unidireccional que se eleva rápidamente a un valor máximo y luego decae en forma lenta hasta cero. Para formar tal forma de onda de voltaje se utiliza lo que conocemos como generador de impulsos. El generador de impulsos actualmente utilizado para simular las sobretensiones, ya sean de origen interno o externo, está basado en el circuito del generador propuesto por el Dr. Emil Marx en Alemania, en el cual se produce una salida de alto voltaje a partir de un cierto número de capacitores los cuales primero son cargados en paralelo y luego descargados en serie conforme se van

disparando secuencialmente los explosores de esferas colocados entre una y otra etapa. El circuito básico se muestra en la figura 2.14, en la cual se han colocado cuatro etapas, aunque el número de estas deben ser las necesarias para producir un determinado voltaje de salida.

Para tener una comprensión clara de el funcionamiento de este equipo se analizara un generador de impulsos de una sola etapa y a continuación se desglosara la forma de operación de un generador de varias etapas.

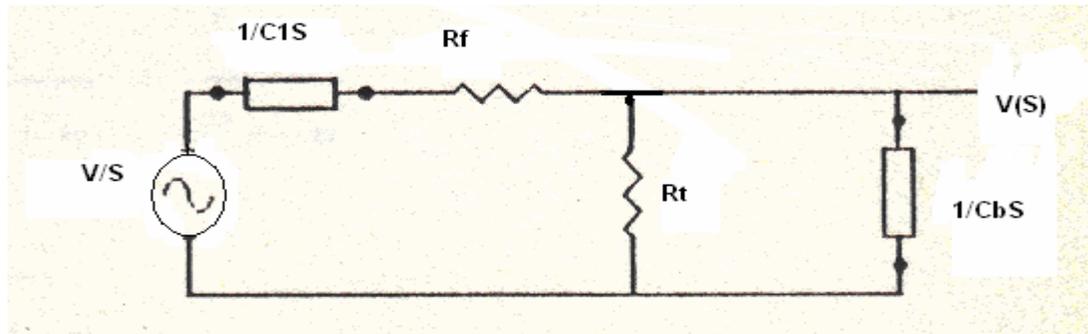
### 2.8.2 Generador de impulsos de una sola etapa

El generador de impulsos de una sola etapa, como su nombre lo indica, corresponde a una parte del generador multietapas y se muestra en la figura 2.11a. Su funcionamiento es el siguiente: El capacitor  $C_1$  se carga con una fuente de CD hasta que el explosor  $G$  alcanza la ruptura (chispea o flamea), entonces se aplica un voltaje en forma de impulso al capacitor  $C_b$  (objeto bajo prueba) de una forma que depende de  $R_f$  y  $R_t$  (estas controlan el frente y la cola del impulso respectivamente). Ver referencia [5] y [13].



(a)

Figura 2.11.a) Generador de impulsos de una sola etapa.  
Circuito en el dominio del tiempo  
 $R_f$ : Resistencia de frente  
 $C_1$ : Capacitancia del generador



b)

Figura 2.11.b) Generador de impulsos de una sola etapa.  
Circuito en el dominio de la transformada de Laplace.

$R_t$ : Resistencia de cola

$C_b$ : Objeto de prueba

Para la obtención de la ecuación de la forma de onda del impulso de voltaje en forma analítica, transformaremos el circuito de la figura 2.11a al de la figura 2.11b, el cual no es más que el circuito transformado de Laplace. Para el cual el voltaje  $V(s)$  viene dado por:

$$V(s) = V/S \left[ \frac{Z_2}{Z_1 + Z_2} \right] \quad \text{Ecu (2.4)}$$

Donde:

$$Z_1 = 1/(C_1 S) + R_f$$

$$Z_2 = \frac{R_t / (C_b S)}{R_t + 1/(C_b S)}$$

Luego sustituyendo tenemos

$$V(s) = \frac{V}{S} * \frac{R_t / (R_t C_b S + 1)}{R_f + 1/C_1 S + R_t / (R_t C_b S + 1)} \quad \text{Ecu (2.5)}$$

Trabajando la ecuación anterior

$$V(s) = \frac{V}{R_f C_b} * \frac{1}{S^2 + aS + b} \quad \text{Ecu (2.6)}$$

Con

$$a = \frac{1}{R_f C_b} + \frac{1}{R_t C_b} + \frac{1}{R_f C_b} \quad b = \frac{1}{R_f R_t C_1 C_b}$$

Expandiendo la ecuación anterior

$$V(s) = \frac{V}{R_f C_b} * \frac{1}{(S_1 - S_2)} \left[ \frac{1}{S - S_1} - \frac{1}{S - S_2} \right] \quad \text{Ecu (2.7)}$$

Transformando al dominio del tiempo

$$v(t) = \frac{V}{R_f C_b (S_1 - S_2)} \left[ e^{S_1 t} - e^{S_2 t} \right] \quad \text{Ecu (2.8)}$$

Como la ecuación auxiliar es

$$S^2 + \left[ \frac{1}{R_f C_1} + \frac{1}{R_t C_b} + \frac{1}{R_f C_b} \right] S + \frac{1}{R_f R_t C_1 C_b} = 0 \quad \text{Ecu (2.9)}$$

Y puesto que en la práctica  $R_t \gg R_f$  y  $C_1 \gg C_b$ , entonces la ecuación auxiliar se puede escribir como:

$$S^2 + S \left[ \frac{1}{R_f C_b} \right] + \frac{1}{R_f R_t C_1 C_b} = 0 \quad \text{Ecu (2.10)}$$

Donde las raíces son:

$$S_1 \approx -\frac{1}{R_t C_1}, \quad S_2 \approx -\frac{1}{R_f C_b}$$

La ecuación para el voltaje de salida se convierte

$$v(t) = V \left[ e^{-t/R_t C_1} - e^{-t/R_f C_b} \right] \quad \text{Ecu (2.11)}$$

La grafica de la expresión anterior se muestra a continuación:

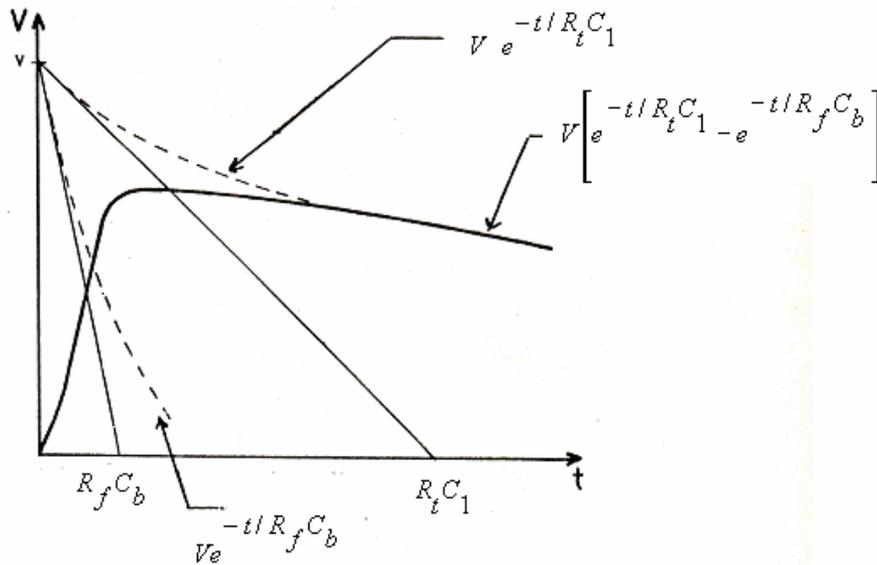


Figura 2.12. Onda de voltaje de impulso y sus componentes

La Ecu (2.11) se puede escribir como

$$v(t) = V \left[ e^{-t/\tau^* t} - e^{-t/\tau^* f} \right] \quad \text{Ecu (2.12)}$$

Donde:

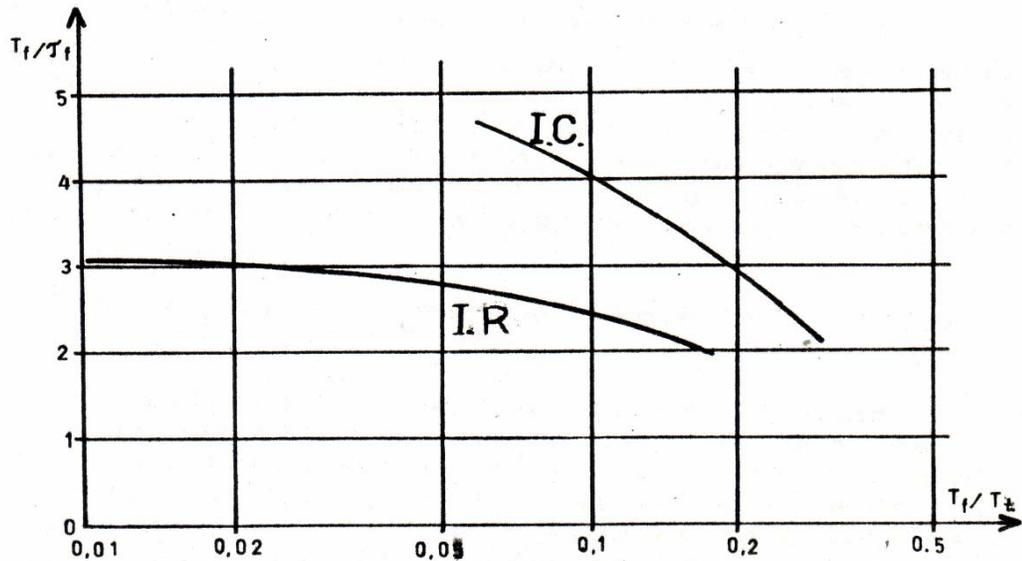
$\tau_t = R_t C_1$ : Constante de tiempo de la cola de la onda de impulso

$\tau_f = R_f C_b$ : Constante de tiempo del frente de la onda de impulso

La resistencia  $R_f$  controla la velocidad de cambio del voltaje sobre la carga, es decir el objeto de prueba, es por esto que se le conoce como resistencia de frente. La resistencia  $R_t$  controla la velocidad de descarga de todo el circuito por esta razón se le conoce como resistencia de cola.

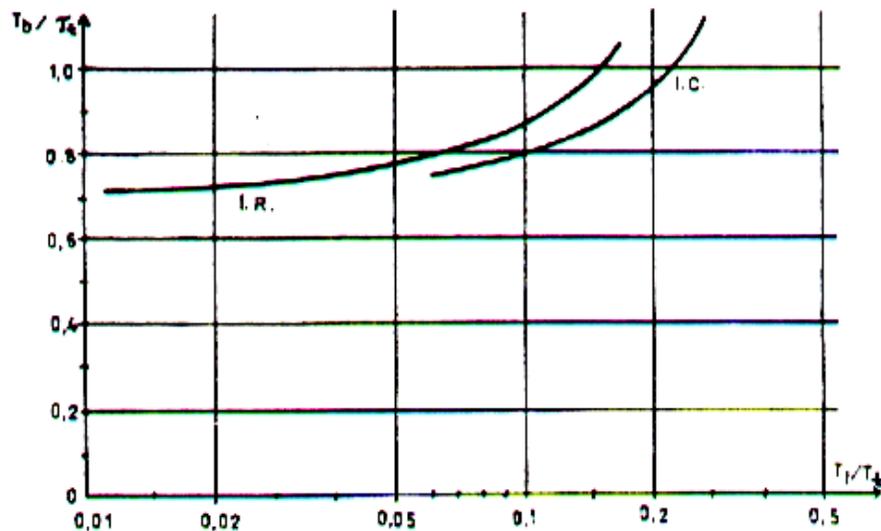
En la práctica, las constantes de tiempo no se conocen pero en lugar de ellas se especifican los tiempos de frente (tiempo de cresta para impulsos de conmutación) y los tiempos de valor medio. La relación entre estos parámetros y las constantes de tiempo se encuentran con la ayuda de la figura 2.13a para tiempos de frente y la figura 2.13b para tiempos de valor medio. Las constantes de tiempo estándar para impulsos de rayo estándar es  $\tau_f = 0.407\mu s$  y  $\tau_t = 86.5\mu s$ .

Para impulsos de conmutación estándar ellas son  $\tau_f = 61.7\mu\text{s}$  y  $\tau_t = 3144\mu\text{s}$ . Ver referencia [6].



a)

Figura 2.13. Relación entre los tiempos de frente  $T_f$  (a) y los tiempos de valor medio  $T_t$  (b) con las correspondientes constantes de tiempo  $\tau_f$  y  $\tau_t$  como una función de  $\tau_f/\tau_t$  para impulsos de rayo (I.R.) e impulsos de conmutación (I.C.).



b)

Figura 2.13. Continuación

### 2.8.3 Generador de impulsos de varias etapas

Este tipo de generador es de gran utilidad comparado con el de una sola etapa, por que con él se puede lograr impulsos de voltaje de gran valor, lo que no es posible con este último. Un circuito típico de un generador de varias etapas es el que se muestra en la figura 2.14, el cual es una combinación de capacitores, resistencias y explosores (sphere gaps).

El funcionamiento básico de este tipo de generador se presenta a continuación:

Los capacitores  $C_1$ ,  $C_2$ ,  $C_3$  y  $C_4$ , son cargados en paralelo a través de las resistencias de carga  $R$ . Después que se han cargado los capacitores ó sea al final del período de carga, los puntos a, c, e y g estarán al voltaje de carga, digamos  $V^+$  y los puntos b, d, f, h, están a cero voltios o sea potencial de tierra. El proceso de descarga se inicia cuando el explosor  $G_1$  arquea, cuando esto sucede el punto d se encuentra a un voltaje igual al de a, el cual corresponde a  $V^+$ , con esto el voltaje del punto c se convierte ahora en  $2V^+$ , con la suma del voltaje en  $C_2$ . En este momento el voltaje en el punto f sigue siendo el potencial de tierra debido a la capacitancia  $C_2$ , esto hace que el explosor  $G_2$  sea sometido a un sobrevoltaje  $2V^+$ , con este potencial este explosor arquea, haciendo que este potencial se traslade a f y el punto e tenga un voltaje de  $3V^+$  el cual hace que el explosor  $G_3$  arquee y esto mismo ocurre con el explosor  $G_4$ . Al final del proceso en los puntos a, c, e y g, el potencial es  $V^+$ ,  $2V^+$ ,  $3V^+$  y  $4V^+$  respectivamente y en el punto i que es el voltaje de salida tenemos  $4V^+$  que no es mas que  $nV^+$ , donde n es el número de etapas<sup>4</sup>.

---

<sup>4</sup>Esto es en forma ideal ya que en la realidad el voltaje de salida se ve afectado por la eficiencia del generador

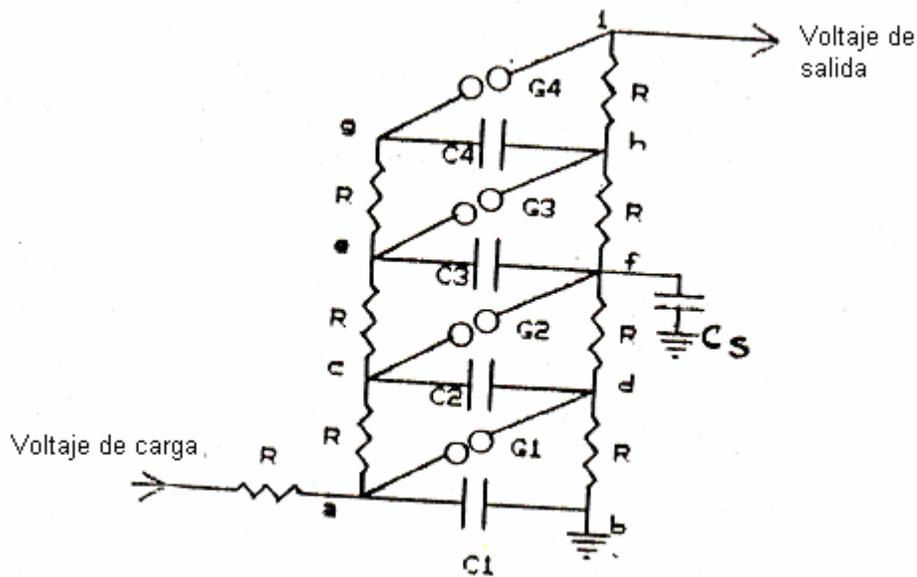


Figura 2.14. Circuito básico para el generador de impulsos de varias etapas.

C<sub>1</sub>, C<sub>2</sub>, C<sub>3</sub>, C<sub>4</sub>: Capacitores  
 G<sub>1</sub>, G<sub>2</sub>, G<sub>3</sub>, G<sub>4</sub>: Explosores  
 R : Resistencias

## 2.9 Requisitos generales de un generador de impulsos

Un generador de impulsos moderno debe reunir uno o más de los siguientes requerimientos, tal como se muestra en la referencia [6].

- Generar impulsos de rayo de  $1.2/50 \mu\text{s}$  y de conmutación de  $250/2500 \mu\text{s}$ , dentro de las tolerancias sobre los objetos de baja capacitancia y con un factor de eficiencia de voltaje razonablemente alto (este se verá más adelante).
- Generar los mismos impulsos del literal a) en objetos con valores de alta capacitancia. El factor de eficiencia de voltaje puede ser más bajo que en a) debido a que los objetos de capacitancia alta casi siempre tienen aislamiento no recuperable y los diferentes procedimientos de prueba para tal aislamiento conduce a voltajes de prueba más bajos.

- c) Generar impulsos no estándar tales como aquellos<sup>5</sup> con tiempo de frente en un rango desde abajo de los impulsos de rayo estándar hasta arriba de los de impulsos de conmutación estándar. También, impulsos con diferentes tiempos de valor medio de aquellos tiempos estándares de interés.
- d) Generar impulsos de rayo y de conmutación en objetos de prueba inductivos como transformadores y reactores. El factor de eficiencia de voltaje puede ser más bajo que en a) debido a las mismas razones mencionadas en b).
- e) Tener posibilidad para operación automática<sup>6</sup>.

## 2.10 El sistema real

El generador de impulsos cuyo principio de funcionamiento se presentó en las secciones anteriores, lo conforman las siguientes partes:

### 1 - El generador de voltaje DC

Este recibe la alimentación de corriente alterna a su entrada y entrega un voltaje DC a su salida, del orden de 100 a 200 KV, pudiéndose invertir su polaridad.

### 2 - El circuito de forma de onda

Este lo constituyen

- Los capacitores de cada una de las etapas del generador
- Las resistencias de cola ( $R_t$ )
- Las resistencias de frente ( $R_f$ )
- La resistencia de salida ( $R_s$ )

Cada una de las resistencias debe tener un valor conveniente y ser ubicado en una posición específica dentro del circuito a fin de producir la forma de onda del impulso necesaria para someter al objeto de prueba.

La inductancia asociada a los conectores, así como a los propios capacitores y resistencias del circuito, tienen un

---

<sup>5</sup> - Para impulsos especiales ver referencia [5].

<sup>6</sup> - En laboratorios mas actualizados el funcionamiento del generador tiene opciones automatizadas, por medio del uso de PC

efecto negativo sobre el comportamiento de este ya que tiende a generar oscilaciones en el inicio del frente del impulso. Estas oscilaciones deben mantenerse a un valor mas bajo que el valor tolerable por las normas (5%) , por esta razón las resistencias de frente comúnmente se mantienen fijos a fin de contrarrestar dichas oscilaciones, correspondiendo así a la resistencia de salida  $R_s$  (el cual tiene derivaciones para obtener diferentes valores de resistencia, que pueden ser adecuados para diferentes objetos sometidos a prueba), complementar la función de  $R_f$  en determinar la velocidad de cambio del voltaje sobre el objeto bajo prueba.

## 2.11 Conexiones alternativas del generador de impulsos

El generador de impulsos aplica el nivel de voltaje nominal, según su capacidad, cuando cada uno de los capacitores de sus etapas se carga en paralelo y luego se conectan en serie para producir el impulso.

Si el generador no va a producir su nivel nominal de impulso de voltaje, porque no lo demanda el objeto bajo prueba, entonces pueden utilizarse formas de conexión alternativas para este. Estas formas dependerán del modelo de generador utilizado.

La forma de utilización más simple de reducir el voltaje máximo de salida es reduciendo el voltaje de carga. La capacitancia  $C_s$  del circuito equivalente, permanece inalterada en este caso. Una segunda opción es cortocircuitar las etapas no utilizadas, sin alterar el voltaje de carga, lo que hace que se obtenga en este caso un valor mayor para  $C_s$ . Una tercera opción es cortocircuitar las etapas que no son necesarias para generar el nivel de voltaje de requerido, en paralelo con las que si se utilizarán, produciéndose así un valor mayor para  $C_s$ . Algunas consideraciones deben tomarse en cuenta para la realización de esta tercera forma de conexión:

- 1- Todas las etapas a conectarse en paralelo deben ser idénticas.
- 2- Pueden generarse una distorsión de la forma de onda del impulso como resultado de la conexión de las etapas en paralelo. Esto es un compromiso que debe aceptarse al hacer este tipo de conexión.

Por otra parte, un determinado valor de  $C_s$  limita un rango de valores de capacitancia que puede tener el dispositivo que se somete a prueba. Si se incrementa el valor de  $C_s$ , puede obtenerse un rango más amplio.

El incrementar el valor de  $C_s$  produce un aumento en la eficiencia del generador.

## 2.12 Eficiencia del generador

La eficiencia del generador de impulsos de rayo y de conmutación viene definida como la razón entre el voltaje de cresta del impulso (V) y el producto resultante del voltaje de carga por el número de etapas (E).

$$\eta = V / E \quad \text{Ecu (2.13)}$$

La cual se compone de dos factores:

- $\eta_c$ : Factor de eficiencia del "circuito", la cual es dependiente del circuito del generador y
- $\eta_s$ : Factor de eficiencia de "forma", debida a la máxima diferencia entre dos exponenciales, la cual es menor que uno. Para una forma dada de la onda de impulso el factor es independiente del circuito del generador y depende solo de  $\tau_f/\tau_t$ , como se muestra en la figura 2.5. El mismo valor de  $\tau_f/\tau_t$  da un valor diferente de  $\eta_c$  para impulsos de rayo y conmutación debido a diferentes tiempos de frente. Para impulsos de rayo estándar  $\eta_c = 0.964$ , y para impulsos de conmutación  $\eta_c=0.906$ .

Lo anterior implica:  $\eta = \eta_c * \eta_s$  Ecu (2.14)

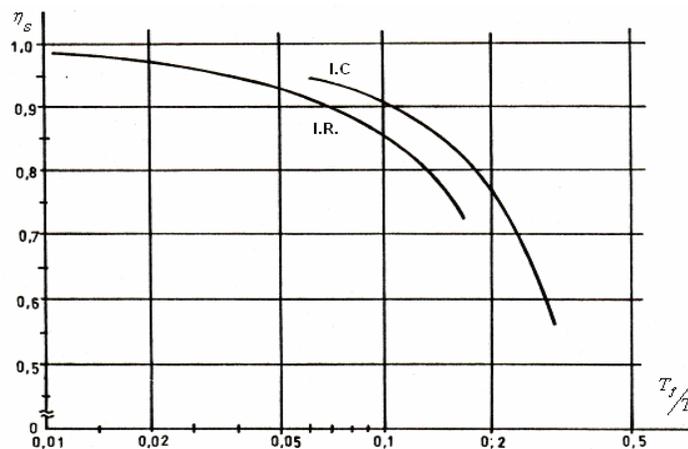


Figura 2.15. Factor de eficiencia de voltaje como función de  $\tau_f/\tau_t$  para impulsos de rayo (I.R), e impulsos de conmutación (I.C)

Para deducir la expresión teórica aproximada de la eficiencia del generador se hace uso del diagrama equivalente del generador en el momento de producirse el frente de la onda. Este se obtiene a partir de la figura 2.16 y se muestra en la figura 2.17. Donde:

- $C_s$  ( $\mu\text{F}$ ): Capacitancia en serie equivalente del generador
- $C_b$  ( $\mu\text{F}$ ): Capacitancia de la carga más el divisor
- $R_s$ : Suma de las resistencias de frente de las etapas
- ( $R_f$ ) más el valor de la resistencia de salida.
- $R_t$ : Suma de las resistencias de cola de las etapas

En la figura 2.17 el capacitor  $C_s$  se ha cargado a un voltaje  $E$ , y se descarga a través de  $R_s$  y  $C_b$ , al arquear el explosor SF. El voltaje  $V$  al cual se ven sometidos ambos capacitores es menor que el valor de voltaje  $E$ , que era el voltaje inicial de carga.

La eficiencia se obtiene igualando la carga que poseía  $C_s$ , antes de darse el arqueo de SF, con la carga que poseen conjuntamente  $C_s$  y  $C_b$ , después de producirse este. Así:

- Antes de producirse el disparo:

$$Q = C_s * E \quad \text{Ecu (2.15)}$$

- Después de producirse el disparo:

$$\begin{aligned} Q &= Q_1 + Q_2 \\ Q &= VC_s + VC_b \\ Q &= V(C_s + C_b) \end{aligned}$$

- Igualando los valores de  $Q$ :

$$\begin{aligned} C_s E &= V(C_s + C_b) \\ \eta &= V/E \\ \eta &= \frac{C_s}{C_s + C_b} \quad \text{Ecu (2.16)} \end{aligned}$$

Lo que viene a demostrar que valores mas altos de  $C_s$  producen un aumento en la eficiencia. Por lo tanto el valor de  $C_s$  debe ser más alto que el valor de  $C_b$ . Por ejemplo para obtener una eficiencia de aproximadamente del 85%,  $C_s$  debe tener un valor de cinco veces  $C_b$ . Usual mente  $C_s$  se calcula para ser de cinco a diez veces  $C_b$ .

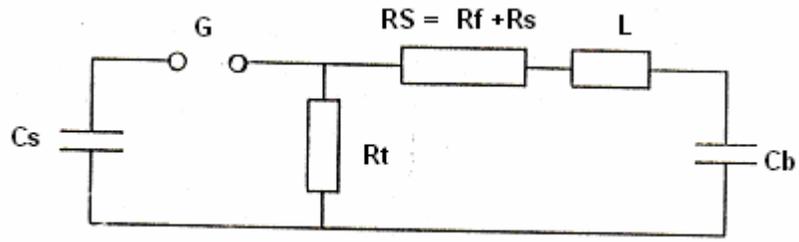


Figura 2.16. Circuito Equivalente del generador de impulsos.

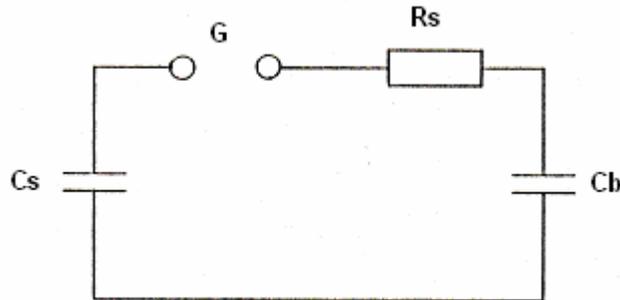


Figura 2.17. Diagrama equivalente del frente de onda

### 2.13 La energía del generador

La energía que se necesita almacenar en el generador de impulsos depende de la capacitancia e inductancia de los objetos sometidos a prueba. La inductancia de los objetos bajo prueba influye cuando los voltajes se elevan a razón de microsegundos, en cuyo caso, hasta pequeños valores de inductancia producen voltajes del orden de los kilovoltios.

El generador de impulsos consta básicamente de redes RC en cascada, por lo que la energía almacenada por el generador cuando el voltaje máximo se alcanza es:

$$W = \frac{V_{\max}^2 C_s}{2} \quad \text{Ecu (2.17)}$$

Donde:

W : Es la energía acumulada en el generador al voltaje Máximo en KJ.

Vmax: Es el voltaje total de carga en KV

Cs : Es la capacitancia total del generador en pF

## 2.14 Generación de impulsos de conmutación utilizando transformadores de prueba de alto voltaje

### 2.14.1 Introducción

La técnica convencional en la generación de impulsos de alto voltaje, utilizando generadores de alto voltaje, se vuelve menos efectiva y más riesgosa en la producción de impulsos de conmutación con frentes muy largos ( $1000\mu\text{s}$  -  $5000\mu\text{s}$ ), debido a problemas como fallas en el disparo de todas las etapas del generador, extinción del arco en los explosores del generador, etc. El uso de transformadores de prueba en cascada para generar impulsos de conmutación presenta, bajo tales circunstancias, ventajas definitivas sobre el método convencional. La generación de impulsos de alto voltaje de transformadores en cascada es particularmente útil durante pruebas intermedias donde proporciona una solución práctica alternativa a un segundo generador el cual, de otra forma sería requerido.

Existen en general dos métodos para la producción de impulsos de conmutación utilizando transformadores de prueba:

1. La forma más fácil que se ha puesto en práctica consiste en descargar un banco de capacitores a través del devanado primario de un transformador. Entonces se desarrolla un impulso de voltaje a través de su devanado de alto voltaje. Sin embargo esta técnica presenta un número de desventajas asociadas con la considerable cantidad de distorsión de alta frecuencia en la forma de onda de salida. Además, el banco de capacitores requerido para producir un voltaje de salida razonable, puede ser de un tamaño considerable. La variación del frente de la onda generada se puede lograr agregando inductancias de diferentes valores en serie con el banco de capacitores. Tal método es tedioso y en muchos casos no económico.
2. Un método mas efectivo para producir voltajes de impulso de conmutación es por medio de energizar al transformador durante un corto tiempo, típicamente menor de  $1/2$  ciclo de la frecuencia de alimentación, varias ventajas son inherentes a este método y son atribuibles a la baja cantidad de distorsión de alta frecuencia en el voltaje de salida, la eliminación de

la energía almacenada en los capacitores y la relativa simplicidad de la unidad de control.

#### **2.14.2 Consideraciones teóricas**

La generación de impulsos de conmutación utilizando transformadores de prueba de alto voltaje puede ser explicada por medio del análisis de su respuesta a un voltaje sinusoidal, repentinamente aplicado a través del devanado primario del transformador por un período de tiempo. Se consideran dos casos: cuando se utiliza un transformador o cuando se ocupa transformadores en cascada.

#### **2.14.3 Limitaciones prácticas**

Refiriéndose a la respuesta transitoria de este método se encuentran dos dificultades prácticas y las cuales juntas constituyen la principal restricción a esta técnica de generación de sobrevoltaje de conmutación:

- 1- La excesiva corriente durante el período de energización comparada con la corriente de estado estable.
- 2- Voltaje de salida innecesariamente alto ocurriendo durante el período de descarga del transformador y como resultado se obtienen flameos no deseados.

### **2.15 Laboratorio de la prueba de impulso**

#### **2.15.1 Introducción**

En esta sección se presentan las partes constituyentes de un laboratorio moderno de la prueba de impulso, con el objetivo de que el lector conozca todos los elementos de este tipo de laboratorio y la relación que sus partes integrantes podrían tener.

En las secciones anteriores se describió el generador de impulsos como formado por aquellos elementos que intervienen en definir la forma de onda del impulso que este genera. Ahora aquí el generador, así como todo el laboratorio, se describirán en sus partes constituyentes, evaluando algunas características, propiedades y limitaciones de ellos.

El explosor de medición, es un elemento fundamental en la prueba impulso. Aquí este se describe en sus dos formas: explosores horizontales y verticales, presentándose además las tablas de valores pico de voltajes de descarga disruptiva, validas para voltajes alternos, de impulsos de rayo, de impulsos de maniobra o conmutación y voltajes directos de cualquier polaridad.

### 2.15.2 Laboratorio de la prueba de impulso

Un laboratorio de la prueba de impulso debe contener todo el equipo necesario para la realización adecuada de los diferentes procedimientos de prueba.

Esencialmente, un laboratorio de la prueba de impulso lo conforman los siguientes sistemas:

- Generador de impulsos
- Sistema de control
- Sistema de medición
- Objeto bajo prueba
- Explosor de esferas (Espinterometro)

El diagrama de bloques de un laboratorio de la prueba de impulso se muestra en la figura 2.18. En ella se muestra la relación que existe entre los sistemas que la conforman.

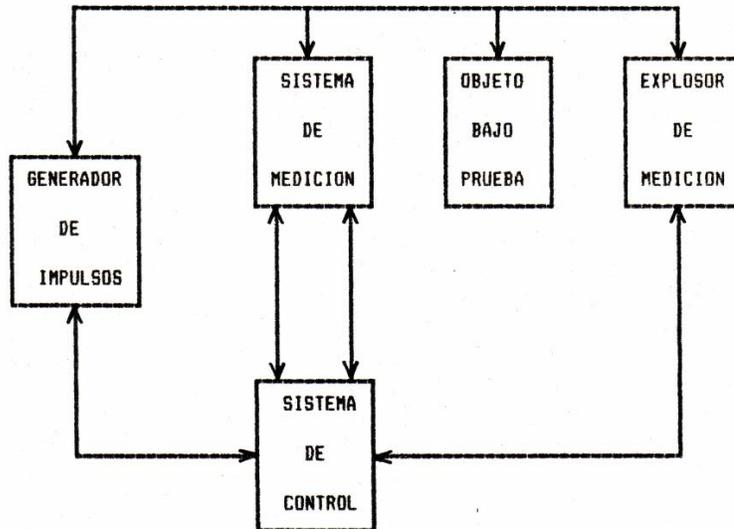


Figura 2.18. Diagrama de bloques de un laboratorio de la prueba de impulso.

### **2.15.3 El generador de impulsos**

Tal como se mencionó anteriormente, el generador de impulsos lo conforman<sup>7</sup>:

#### **2.15.3.1 El generador de voltaje DC**

Este a su vez lo conforman los siguientes equipos:

##### **1) El transformador de aislamiento**

Este tiene la función de proteger el personal del laboratorio, así como al equipo mismo contra sobrevoltaje que se inducen en condiciones de fallas debidas a la proximidad de las líneas de potencia.

Los terminales de un lado del transformador se encuentran a un potencial de tierra local. Este último puede llegar a valores de varios KV durante una falla del sistema. En la aplicación para el generador de impulsos la finalidad del transformador de aislamiento es proteger el sistema exterior contra las sobretensiones que se producen en el generador. Usualmente su relación de transformación es 1:1.

##### **2) Regulador de voltaje**

Este tiene como función permitir variar el voltaje de carga a fin de poder producir los niveles de voltajes de impulso necesarios para someter a prueba los distintos dispositivos bajo prueba.

##### **3) Transformador elevador de la fuente**

Este se conecta a la salida del regulador de voltaje y tiene como función elevar el nivel de voltaje a valores que se necesitan tener en la entrada del rectificador a fin de producir el voltaje de carga necesario.

---

<sup>7</sup>Según referencia [5]

#### 4) El rectificador

Su función es convertir el voltaje AC proporcionado por el transformador elevador a un voltaje DC, con el que deben cargarse las etapas del generador de impulsos.

#### 5) La resistencia de medida

Una de sus funciones es determinar el momento en el cual se da la ruptura en el primer explosor, iniciándose la descarga y otra es proporcionar una medida del voltaje de carga del generador.

##### 2.15.3.2 El circuito de forma de onda

Como se vera a continuación, en el circuito de forma de onda tiene influencia la capacitancia del objeto a someterse a prueba. Este circuito consta de:

- a) Divisor de voltaje
- b) Capacitancia de impulso total
- c) Resistencia de cola
- d) Resistencia de frente
- e) Capacitancia de carga

Uno de los circuitos generalmente usados para generar la forma de onda del impulso, se muestra en la figura 2.19.

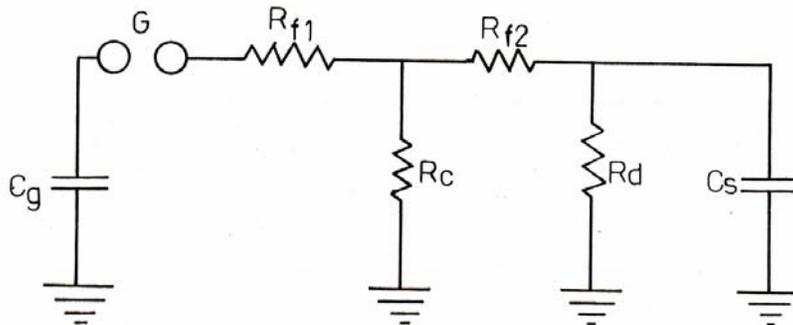


Figura 2.19. Circuito de forma de onda de impulso

- $R_c$  : Resistencia de cola
- $R_d$  : Divisor de voltaje
- $R_f$  : Resistencias de frente
- $C_s$  : Capacitancia de impulso
- $C_c$  : Capacitancia de carga

#### 2.15.4 El sistema de control

Su complejidad dependerá del laboratorio en particular de que se trate. El sistema de control ejerce mando sobre el generador de impulsos, así como sobre el sistema de medición. Este realiza funciones tales como:

- Suministro de energía al generador de impulsos.
- Puesta a tierra de todo el sistema en caso de emergencias.
- Ajuste automático de la distancia entre las esferas de las distintas etapas.
- Control y ajuste del voltaje de carga de los capacitores.
- Control del disparo del generador.
- Sincronización del disparo del generador con la orden de habilitación del sistema de medida a fin de obtener una lectura adecuada del voltaje de impulso aplicado al objeto bajo prueba.

Las funciones mencionadas anteriormente pueden diversificarse, dependiendo de la complejidad del equipo instalado en el laboratorio, pudiendo en algunos casos, el realizarse toda la prueba en forma automatizada, es decir, que un computador ejerce la función de control sobre todo el sistema. Y estas competen al dispositivo trigatron, como se vera mas adelante. El sistema de control esta compuesto de:

##### 2.15.4.1 Consola de control

Los circuitos de medición y control son construidos en módulos instalados en una consola de control de tipo escritorio o tipo gabinete o tipo pulpito. Estos módulos son interconectados de tal forma que varias funciones necesarias para apearar el generador de impulsos sean efectuadas en la secuencia correcta.

El equipo básico consiste en un módulo de medición, un módulo de control y una fuente de alimentación.

El módulo de medición consta de un amperímetro para indicar la corriente a la entrada del rectificador de carga; un indicador de posición, con escalas en mm y KV, para los explosores de acople del generador de impulsos, con el sistema de alimentación; y un voltímetro para la indicación del voltaje de carga de las etapas del generador.

Un módulo de control contiene un potenciómetro de ajuste para el control manual del voltaje de carga; pulsadores e

indicador para el cambio de polaridad y fuente de alimentación para los dispositivos de puesta a tierra.

La fuente de alimentación incluye un interruptor principal para los circuitos de control, pararrayos, disyuntores, y filtros para la protección contra perturbaciones de la fuente principal.

#### 2.15.4.2 Trigatrón

Este es el dispositivo que permite controlar el momento en que se va a disparar el generador de impulsos. Aunque no es el único dispositivo que puede realizar esta función, es uno de los más utilizados. Y su funcionamiento es el siguiente: De los explosores principales (los de la primera etapa), uno de ellos está provisto de un pequeño agujero en el cual se introduce un tubo de metal de aproximadamente 1mm de diámetro. Este tubo junto con el explosor de tierra, forman un explosor adicional, el cual es disparado por un impulso transmitido a través de un capacitor de acople (capacitor trigatrón). El disparo de este explosor auxiliar distorsiona el campo electrostático que se establece entre los explosores principales lo cual hace que se pueda producir la ruptura entre ellos a un voltaje mucho menor que el que se requeriría en ausencia del pulso de disparo, según referencia [5]. Ver figura 2.20.

En la actualidad el equipo trigatrón es tan sofisticado que realiza las siguientes funciones:

- a) Disparo manual o automático con ajuste digital de retraso en el rango de 0 a 1000  $\mu$ s. Para:
  - Generador de impulsos de voltaje o de corriente.
  - Explosores de ondas recortadas.
- b) Sincronización del disparo del generador con una fuente externa de voltaje AC. De esta forma, es posible combinar pruebas de alta tensión AC con ondas de impulso superpuestas con ángulo de fase ajustable.
- c) Ajuste automático del explosor de acople del generador, en función del voltaje de carga seleccionado.
- d) Iniciación del equipo graficador de un osciloscopio.
- e) Carga controlada del generador de impulso con ajuste del tiempo y de voltaje carga.
- f) Estabilización del voltaje de carga al valor prefijado.

- g) Monitoreo del voltaje de carga del generador de impulsos (protección contra sobrecarga).
- h) Señalización de incidentes especiales.

#### 2.15.4.3 Sistema de control de espaciamento de los explosores.

Este es necesario por el hecho que se manejaran diferentes niveles de voltaje y se logra controlando el espaciamento de los explosores.

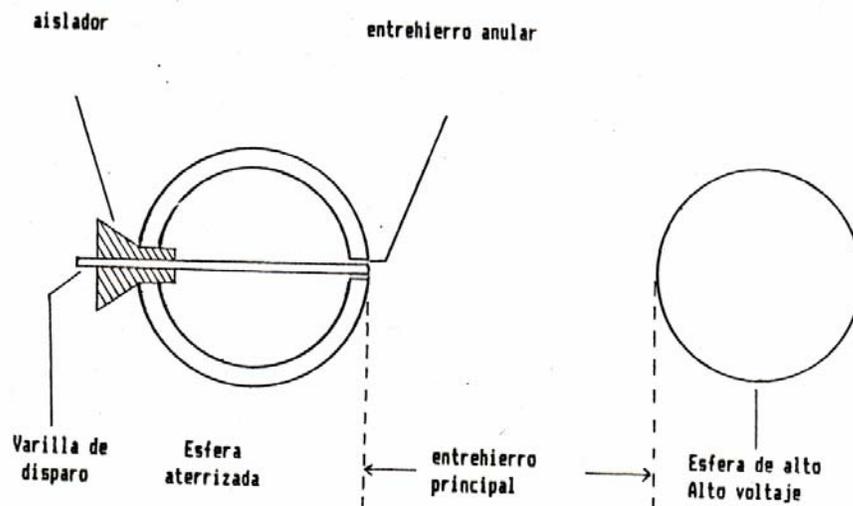


Figura 2.20. Dispositivo trigatron

### 2.16 El sistema de medición<sup>8</sup>

#### 2.16.1 Generalidades

El sistema de medición para voltajes de impulso de rayo y de maniobra o conmutación debe ser capaz de registrar velocidades de cambio de voltaje más altas que aquellas utilizadas para la medición de otro tipo de voltajes. En consecuencia los componentes del sistema deben estar específicamente diseñados para tener una buena respuesta transitoria.

<sup>8</sup> Para mayor información consultar referencia [3]

## 2.16.2 Componentes del sistema de medida

Un sistema de medición de altos voltajes o altas corrientes (excepto explosores de esferas), comprende generalmente:

- a) Un dispositivo convertidor, por ejemplo un divisor de voltaje, una impedancia de medición de alto voltaje o un derivador.
- b) Cables requeridos para la conexión de este dispositivo con el circuito de prueba.
- c) Un cable de medición, junto con cualquier impedancia adaptadora, atenuadora o terminante.
- d) Los instrumentos indicadores o de registro .
- e) Circuitos de retorno de tierra

Las características más importantes de estos componentes se explicaran a continuación:

### 1. Divisor de Voltaje

Un divisor de voltaje es un dispositivo el cual tiene como función producir una fracción conveniente del voltaje de prueba para las medidas. Usualmente tienen dos impedancias conectadas en serie a través de las cuales se aplica el voltaje. Una de ellas, el brazo de alto voltaje, toma la mayor fracción del voltaje. El voltaje a través del otro brazo, el correspondiente al bajo voltaje, se utiliza para la medición. Los componentes de los dos brazos son usualmente resistencias ó capacitares ó una combinación de estos y el dispositivo se nombran por el tipo y arreglo de los componentes.

Muchos divisores de alto voltaje tienen capacitancias dispersas distribuidas a tierra y a objetos vecinos energizados ó aterrizados. En divisores resistivos, estas capacitancias afectan las características de repuestas puesto que ellas se deben cargar y descargar a través de la resistencia del divisor; en divisores capacitivos las capacitancias dispersas afecta el factor de escala del sistema.

Las principales fuentes de error comunes a todos los tipos de divisores son:

- a) Inductancia residual en cualquier resistencia, o elemento capacitivo.
- b) Capacitancia parásita:
  - i) Desde cualquier sección del divisor al terminal de alto voltaje.
  - ii) Desde cualquier sección del divisor a tierra; y
  - iii) Entre secciones del divisor.
- c) Caída en el conductor entre el divisor y el objeto de prueba.
- d) Caída en el retorno de tierra desde el divisor a consecuencia de corrientes de tierra externas fluyendo en este conductor.
- e) Oscilación en el circuito divisor causadas por la capacitancia del terminal de alto voltaje del divisor a tierra y la inductancia del conductor.

El efecto de la inductancia residual se hace muy pronunciado en el rango de fracciones de microsegundos, cuando el voltaje aplicado al objeto de prueba se está incrementando rápidamente y ocurre un arco entre el divisor y el objeto de prueba. La corriente a través de un divisor de voltaje resistivo se incrementa a una razón específica y la inductancia residual en cada elemento del divisor generará un voltaje  $L(di/dt)$ , el cual está superpuesto a la caída  $IR$ . Si los elementos de alto voltaje (cables) tienen distinta razón  $L/R$ , la división de voltaje en el momento del arco puede ser diferente a la que se obtendría con sólo la proporción de resistencias. Este error se vuelve despreciable cuando el arco ocurre en la cola de la onda.

Para minimizar el error en la medición, el objeto de prueba es generalmente localizado no muy cerca del divisor para evitar la posibilidad de que el divisor distorsione el campo cerca del objeto.

## 2- Cables de alto voltaje

La longitud, posición y diámetro del cable conector, del terminal de alto voltaje del divisor hasta el terminal de alto voltaje del objeto de prueba puede influenciar el sistema de medida.

El cable del alto voltaje del divisor debe ser conectado directamente al terminal de alto voltaje del objeto de prueba y no al generador de impulsos o a cualquier punto en

el cable de interconexión. Esto evita inclusión en la medida de la caída de voltaje inductiva en este cable, sin embargo cuando se miden impulsos de rayo pleno ó recortados estándar en la cola, se puede asumir en general que el error debido a la conexión del divisor a un punto intermedio en el cable entre el generador y el objeto de prueba es despreciable si se satisface la condición  $\sqrt{LC} \leq 0.05 \mu s$ , aquí L es la inductancia en microhenrios de la parte del cable la cual está entre el divisor y el objeto de prueba, y C es la capacitancia afectiva del objeto de prueba en microfaradios.

La longitud total del cable entre el divisor de voltaje y el objeto de prueba es entonces considerada como el cable de alto voltaje del sistema de medición.

### **3- Resistencias de amortiguamiento**

Una resistencia de muy baja inductancia se puede insertar en el cable de alto voltaje con el fin de amortiguar oscilaciones. Esta resistencia puede no ser colocada cerca del divisor ó en el extremo de entrada del cable de alto voltaje al objeto bajo prueba. En el primer caso, la resistencia se considera como parte del divisor y el sistema se describe entonces como uno de dos componentes. En el segundo caso, el sistema se describe como uno de tres componentes.

Cualquiera que sea la posición de la resistencia, su valor se debe tomar en cuenta cuando se determina la razón del sistema de medición.

### **4- Osciloscopio**

Un osciloscopio para medir impulsos es esencialmente un instrumento bien blindado con una alta velocidad de trazo y con una base de tiempo adecuada, el cual puede ser disparado en sincronismo con el impulso por medio del trigatrón. Se debe proporcionar medios para la calibración de la velocidad de barrido y la sensibilidad de la deflexión de voltaje. También se debe suministrar registros fotográficos de los oscilogramas.

El osciloscopio normalmente se proporciona con un conector de entrada para el cable coaxial que viene del divisor de voltaje. La impedancia de entrada como es vista por este conductor debería de igualarse con la impedancia característica del cable coaxial ó ser tan alta como sea posible dependiendo del tipo de divisor.

## 5- Voltímetros de lectura de cresta

Este es un instrumento el cual usualmente funciona cargando un capacitor a través de rectificadores, a un voltaje el cual es proporcional al valor pico del impulso que se va a medir. La carga es retenida en el capacitor y es leída por medio de un amplificador de una alta impedancia, además de instrumentos indicadores ó de registro los cuales son incorporados en el dispositivo. Tal equipo tiene un error el cual depende de la forma del impulso que se ha de medir y debe determinarse experimentalmente. La impedancia de entrada del instrumento está sujeta a las mismas restricciones que para el osciloscopio. Debería de notarse que muchos instrumentos de este tipo se les ha encontrado que son muy sensitivos a interferencias, especialmente si se miden impulsos con recortes muy agudos.

## 6- Cable coaxial y dispositivos de acoplamiento

Cualquier cable que se utilice en la medición en el lado de bajo voltaje del sistema de medida, debe ser coaxial del tipo de alta frecuencia. Las pérdidas dieléctricas del aislamiento y la resistencia del conductor interno y de la cubierta pueden introducir errores. Es esencial que los cables sean acoplados a uno ó a ambos extremos para prevenir reflexiones múltiples las cuales pueden resultar en errores en la medición. Si el cable principal se conecta a dos ó mas instrumentos al mismo tiempo y la longitud de los cables conectores adicionales no se puede despreciar con respecto al del cable principal, un dispositivo de acoplamiento debe ser insertado y todos los cables deben ser acoplados. Cuando las longitudes de los cables adicionales son despreciables, no se utilizan dispositivos de acoplamiento y solamente se acopla un cable.

## 7- Retornos de tierra

Hay varios puntos en el sistema de generación y medición los cuales están interconectados y conectados al terminal de tierra del objeto de prueba. Es importante que la impedancia entre todos estos puntos se mantengan en un mínimo. Se necesita especial cuidado en áreas de corrientes de tierra intensas, en el terminal de prueba, del generador de impulsos y de cualquier capacitor de carga. Esta minimización se puede llevar a cabo por medio de el uso de conductores de retorno de grandes láminas de conductores no magnéticos o por medio de conexiones cortas de tierra a una

gran lamina de metal o malla en / o sobre el piso del área de prueba.

## 2.17 El objeto bajo prueba

### 2.17.1 Aisladores

Todos los componentes que forman parte de una red de alto voltaje se diseñan y construyen de manera tal que estos soporten los esfuerzos resultantes debidos a campos eléctricos ó que estos sean minimizados. Por tanto el gradiente de potencial es mínimo ó el mínimo posible. La distribución del campo eléctrico de un dispositivo aislador en particular, se obtiene mediante el estudio del comportamiento de las superficies equipotenciales en la región de interés. En los lugares donde exista una alta concentración de líneas de fuerza en espacios reducidos se puede considerar que existe una alta caída de voltaje o lo que es equivalente a decir que habrá un elevado esfuerzo en tal zona lo que puede llevar a la ruptura temprana del aislamiento. Existe un mayor problema cuando el dispositivo se encuentra sometido a voltajes de impulso, ya que la no uniformidad de la distribución del voltaje se acentúa aun más que cuando se encuentra sometido a su tensión nominal de trabajo.

Para aisladores de porcelana convencionales, los más altos valores de esfuerzo eléctrico se localizan en la superficie inferior, particularmente alrededor del pin cuando se encuentra sometido a un nivel de tensión en C.D. Cuando el aislador se encuentra sometido a una onda de impulso, se pueden dar los siguientes fenómenos: debido a la velocidad de incremento de tensión (muchos KV por microsegundo), se da un efecto de puntualización de esfuerzos, o sea, que las líneas de campo tienden a concentrarse a gran velocidad en un área reducida con la siguiente posibilidad de perforación del dieléctrico; otra situación de particular interés se presenta a causa del elevado nivel de tensión de trabajo del dispositivo aislador; este elevado nivel puede causar ionización del aire que circula por el aislador, ionización que, dependiendo de la polaridad de la onda, puede generar un efecto corona positivo o negativo que permite la creación de un arco o flameo externo del dispositivo, además existe la posibilidad de ionización y/o polarización del dieléctrico sólido que le da cuerpo al aislador, la cual, actuando en conjunto con los esfuerzos electromecánicos que se generan, puede agrietar el dieléctrico formando canales de descarga a través del sólido, lo cual inutilizaría al dispositivo.

En general no se puede predecir de manera exacta el lugar y la forma de como va a fallar un aislador, ya que depende tanto de las características de los materiales de que esta construido, así como también de la geometría de construcción, además de los niveles de tensión, forma de onda y condiciones atmosféricas (humedad, contaminación, etc.). Los puntos más frecuente de fallas son las zonas de unión de los electrodos con el aislador, donde suelen darse las mayores concentraciones de esfuerzo.

### **2.17.2 Transformadores**

En general los transformadores son sometidos a diversas pruebas para tener una certeza razonable de que este ha sido diseñado y construido de manera adecuada para entregar la carga nominal mientras resiste todas las condiciones de peligro a las cuales podemos esperar que esté expuesto por un período de 20 años o más.

Las pruebas según ANSI C57-12.90, a las que debe someterse un transformador, son las siguientes:

- a) Relación de transformación, polaridad y conexiones de los devanados.
- b) Mediciones de resistencia.
- c) Impedancia, regulación y pérdidas bajo carga.
- d) Pérdidas en vacío y corriente de excitación.
- e) Pruebas de temperatura.
- f) Pruebas dieléctricas.

El orden de las pruebas no corresponde al orden de importancia, sino al orden inverso de sus posibles efectos sobre las características del transformador. Las pruebas de aislamiento son las últimas, ya que son las más importantes y podrían ser destructivas si este no cumple con lo que establecen las normas. Estas pruebas indican que el transformador, después de soportar todas las pruebas, aún tienen un aislamiento adecuado.

#### **I- Pruebas dieléctricas**

El aislamiento de un transformador es probablemente su más importante cualidad. Un transformador puede realizar su función si su regulación y pérdidas son grandes, aún si su temperatura es demasiado alta pero si su aislamiento falla, el transformador es una pérdida total, pudiendo aún dañar equipo asociado a él. Para determinar la resistencia

dieléctrica del aislamiento del transformador, es necesario considerar además del voltaje de servicio normal, condiciones anormales de sobrevoltaje que se representan para propósitos prácticos de diseño por pruebas de impulso.

Las pruebas de aislamiento pueden ser en forma de pruebas de "resistencia", para verificar una resistencia dieléctrica mínima especificada en una forma determinada o en forma de pruebas de ruptura para determinar la resistencia dieléctrica real.

## II- Pruebas de Voltajes de Impulso

Los transformadores son diseñados para soportar cierto nivel básico de aislamiento al impulso (BIL)<sup>9</sup>. Ver sección 2.6.

Para el caso de transformadores, las pruebas a las que este es sometido son las siguientes:

### 1- Onda de voltaje reducido (reduce wave)

Esta generalmente se genera para establecer una onda patrón ó de referencia.

### 2- Onda completa (full wave)

Esta simula una onda viajera causada por una descarga Atmosférica.

### 3- Onda recortada (chopped wave)

La onda recortada es de la misma forma de la onda completa, pero con un 15% mayor en el valor de cresta y recortada en aproximadamente a los 3  $\mu$ s. Esta onda simula la caída de voltaje cuando un aislador ó pararrayos flamea cerca del transformador, produciendo condiciones severas de esfuerzo dentro del devanado.

Además de las pruebas de onda completa y de onda recortada, algunas veces se efectúa la llamada prueba de frente de onda.

## 2.18 El explosor de esferas

El explosor de esferas (Sphere gap), es un dispositivo de medida de voltaje de pico y consiste de dos esferas de

---

<sup>9</sup>BIL ( Basic Impulse Insulation Level )

metal del mismo diámetro(D), con sus ejes y su sistema de movilización, soportes aislantes, así como también cables para la conexión al punto en el cual el voltaje va a ser medido. Los valores estándar de D son: 125, 250, 500, 525, 750, 1000, 1500 y 2000 mm. El espacio entre las esferas se designa como S. Los puntos sobre las esferas que están mas cerca el uno sobre el otro son llamados puntos de flameo ó chispeo (Sparkíng point). En la práctica las descargas ocurren entre otros puntos cercanos a los puntos de chispeo. La figura 2.21a y la figura 2.21b, muestran dos arreglos, uno de los cuales es típico de explosores de esferas con eje vertical, mientras que el otro es típico de explosores de esferas con eje horizontal. Para mayor información ver la referencia [12].

El estado de las superficies de las esferas en la vecindad del punto de chispeo debe estar libre de cualquier residuo de esmalte, grasa u otra capa protectora. Ellas deberán ser limpiadas y secadas, pero no necesitan ser pulidas. Si las esferas se vuelven excesivamente ásperas o picadas por el uso, deberán ser rebruñidas o reemplazadas<sup>10</sup>.

#### 2.18.1 Altura de las esferas sobre el plano horizontal de tierra

El explosor de esferas se utilizara sobre un plano horizontal de tierra, tal como una malla conductora en/o sobre el piso del laboratorio o una superficie conductora sobre el soporte en el cual se coloca el explosor de esferas. La altura A del punto de chispeo de la esfera de alto voltaje sobre tal plano de de tierra estará dentro de los límites dados en la tabla 2.6. Estos requerimientos se aplican tanto a explosores verticales como a horizontales.

---

<sup>10</sup> Si la humedad relativa del aire excede del 90%, esta puede condensarse en las superficies y las medidas no serán muy precisas.

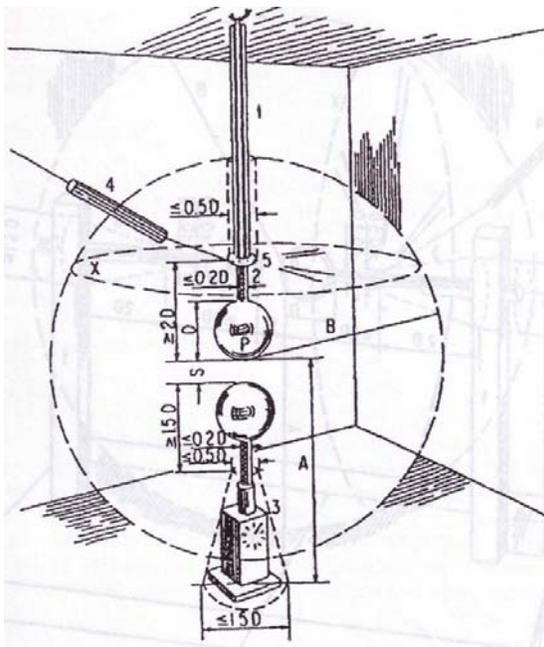


Figura 2.21a. Explosor de esferas vertical

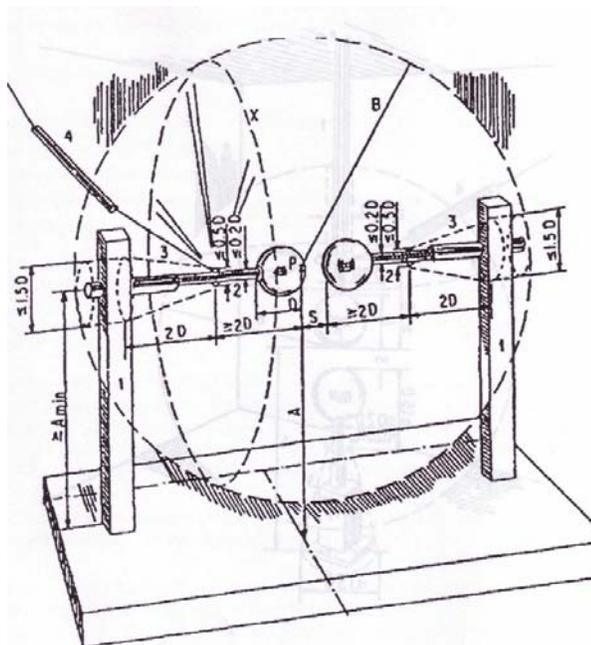


Figura 2.21b. Explosor de esferas horizontal

Tabla 2.6 requerimientos de espacio alrededor de las esferas

Diámetro de las esferas D (mm)	Valor mínimo de A	Valor máximo de A	Valor mínimo de B
62.5	7D	9D	14S
125	6	8	12
250	5	7	10
500	4	6	8
750	4	6	B
1000	3.5	5	7
1500	3	4	6
2000	3	4	6

Si el explosor de esferas esta montado con la esfera aterrizada mas cercana al techo y si otras superficies, tales como paredes y el piso están a una distancia considerablemente mas grande, entonces el cielo puede ser considerado como un plano horizontal , desde el cual se puede medir la distancia A hacia abajo, ver referencia [12].

### 2.18.2 Medición de voltaje de impulso

Con el fin de obtener el voltaje de descarga disruptiva de 50% de un explosor de esferas, el espaciamento del explosor ó el voltaje de carga del generador de impulso se ajustará en pasos correspondientes a no más de 2% de los valores de descarga disruptiva. Seis aplicaciones de impulsos deben ser aplicados a cada paso. El intervalo entre aplicaciones no será menor que 5 segundos. El valor dado de 50% de probabilidad de descarga disruptiva es preferiblemente obtenido por interpolación entre al menos dos ajustes de distancias ó de voltajes, uno como resultado de dos descargas disruptivas o menos y el otro en cuatro descargas disruptivas o más.

Otro método, menos preciso, es fijar los ajustes hasta que se obtienen de cuatro a seis descargas disruptivas en una serie de diez aplicaciones sucesivas.

### 2.18.3 Voltajes de descarga disruptiva de explosores de esferas

Los voltajes de descarga disruptiva para varios espaciamentos entre esferas se dan en las tablas 2.7 y 2.8.

La tabla 2.7 da los voltajes disruptivos (valores de 50% en pruebas impulso) en kilovoltios pico para:

- Voltajes alternos
- voltajes impulso de rayo negativos
- voltajes impulso de maniobra o conmutación negativos y
- voltajes directos de cualquier polaridad.

Esta tabla no es válida para la medición de impulsos abajo de 10 Kv,

La tabla 2.8 da los voltajes de descarga disruptiva de 50% en kilovoltios pico para:

- Voltajes impulso de rayo positivos y
- Voltajes impulso de maniobra o conmutación positivos

#### Precisión de las tablas 2.7 y 2.8

Para espaciamentos hasta 0.5D, las tablas se consideran precisas dentro del  $\pm 3\%$ . Los valores en las tablas para espaciamentos entre 0.5D y 1.0D, se les considera menos precisa, por tal razón están entre paréntesis. Para mayor información de estas tablas ver la referencia [12]

Tabla 2.7 (parte 1).Valores pico de voltajes de descarga disruptiva (de 50% para pruebas de impulso) con explosores de esferas con una esfera aterrizada. Estos son validos para:

- Voltajes alternos
- Voltajes impulso de rayo negativos
- Voltajes impulso de maniobra o conmutación negativos
- Voltajes directos de cualquier polaridad

Esto es bajo condiciones atmosféricas de referencia 20°C y 101.3 KPa.

Espaciamiento del Explosor de esferas (mm)	Voltaje en Kv pico		
	Diámetro de las esferas en (cm)		
	6.25	12.5	25
5	17.2	16.8	
10	31.9	31.7	
15	45.5	45.5	
20	58.5	59	
25	69.5	72.5	72.5
30	79.5	85	86
35	(87.5)	97	
40	(95)	108	112
45	(101)	119	
50	(107)	129	137
55	(112)	138	
60	(116)	146	161
62.5	(117)	150	
70		(161)	184
80		(174)	206
90		(185)	226
100		(195)	244
110		(203)	261
120		(212)	275
125		(214)	282
150			(314)
175			(342)
200			(366)
225			(385)
250			(400)

Tabla 2.7 Parte 2.

Espaciamiento del Explosor de esferas (mm)	Voltaje en Kv pico				
	Diámetro de las esferas en (cm)				
	50	75	100	150	200
50	138	138			
75	202	203			
100	263	265	266	266	266
125	320	327			
150	373	387	390		
175	420	443			
200	460	492	510	510	510
250	530	585	615		
300	(585)	665	710	745	750
350	(630)	735	800		
400	(670)	(800)	875	955	975
450	(700)	(850)	(945)		
500	(730)	(895)	(1010)	1130	1180
600		(970)	(1110)	1280	1340
700		(1025)	(1200)	1390	1480
750		(1040)	(1230)	1440	1540
800			(1260)	(1490)	1600
900			(1320)	(1580)	1720
1000			(1360)	(1660)	1840
1100				(1730)	(1940)
1200				(1800)	(2020)
1300				(1870)	(2100)
1400				(1920)	(2180)
1500				(1960)	(2250)
1600					(2320)
1700					(2370)
1800					(2410)
1900					(2460)
2000					(2490)

Tabla 2.8 (parte 1).Valores pico de voltajes de descarga disruptiva (de 50% para pruebas de impulso) con explosores de esferas con una esfera aterrizada. Estos son válidos para:

- Voltajes impulso de rayo positivos
- Voltajes impulso de maniobra o conmutación positivos
- Voltajes directos de cualquier polaridad

Esto es bajo condiciones atmosféricas de referencia; 20°C y 101.3 KPa.

Espaciamiento del Explosor de esferas (mm)	Voltaje en KV pico		
	Diámetro de las esferas en cm		
	6.25	12.5	25
5	17.2	16.8	
10	31.9	31.7	
15	45.9	45.5	
20	59	59	
25	71	72.5	72.5
30	82	85.5	86
35	(91.5)	98	
40	(101)	110	112
45	(108)	122	
50	(115)	134	138
55	(222)	145	
60	(127)	155	163
62.5	(128)	160	
70		(173)	187
80		(189)	211
90		(203)	233
100		(215)	254
110		(229)	273
120		(234)	291
125		(239)	299
150			(337)
175			(368)
200			(395)
225			(416)
250			(433)

Tabla 2.8 parte 2

Espaciamientos explosor de esferas (mm)	Voltaje en Kv pico				
	Diámetro de las esferas en cm				
	50	75	100	150	200
50	138	138			
75	202	202			
100	263	265	266	266	266
125	323	327			
150	380	387	390		
175	432	447			
200	460	505	510	510	510
250	555	605	620		
300	(620)	695	725	745	750
350	(670)	770	815		
400	(715)	835	900	965	980
450	(745)	(890)	(980)		
500	(775)	(940)	(1040)	1150	1190
600		(1020)	(1150)	1310	1380
700		(1070)	(1240)	1430	1550
750		(1090)	(1280)	1480	1620
800			(1310)	(1530)	1690
900			(1370)	(1630)	1820
1000			(1410)	(1720)	1930
1100				(1790)	(2030)
1200				(1860)	(2120)
1300				(1930)	(2200)
1400				(1980)	(2280)
1500				(2020)	(2350)
1600					(2410)
1700					(2470)
1800					(2510)
1900					(2550)
2000					(2590)

Todos los equipos mencionados anteriormente forman parte de lo que aquí llamamos el laboratorio de la prueba de impulso.

La figura 2.18, muestra el diagrama de bloques de tal laboratorio, mostrando los sistemas que lo componen: Generador de impulsos, sistema de control, sistema de medición, objeto bajo prueba y explosor de esferas.

Ahora para lograr una mejor visualización del sistema de voltajes de impulso, en la figura 2.22 se muestra el diagrama de bloques para uso general.

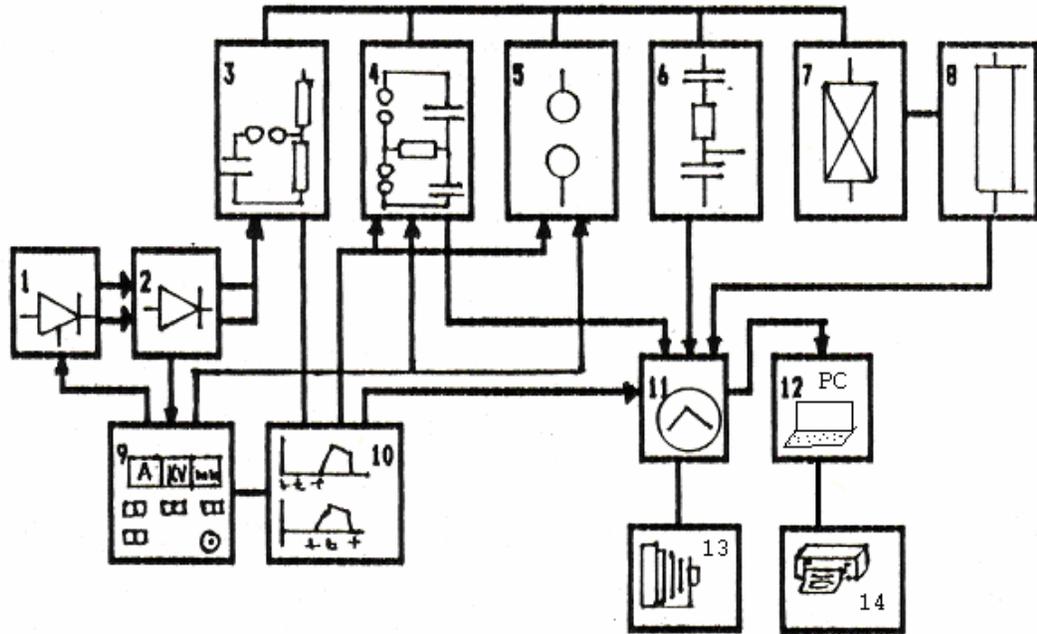


Figura 2.22. Diagrama de bloques detallado de un laboratorio de la prueba de impulso.

- |                              |                          |
|------------------------------|--------------------------|
| 1- Regulador de voltaje.     | 9- Consola de control    |
| 2- Rectificador              | 10- Trigatron            |
| 3- Generador de impulsos     | 11- Osciloscopio impulso |
| 4- Explosor de corte de onda | 12- PC                   |
| 5- Explosor esférico         | 13- Equipo fotográfico   |
| 6- Divisor de voltaje        | 14- Impresor             |
| 7- Objeto bajo prueba        |                          |
| 8- Resistencia de derivación |                          |

## **2.19 Seguridad e instalación para un laboratorio de alto voltaje**

### **2.19.1 Introducción**

El objetivo fundamental de esta sección es presentar criterios relacionados a requerimientos de espacio y de seguridad en laboratorios de alta tensión, muy importantes en toda instalación de este tipo.

Se presentan temas relacionados a las condiciones de instalación, se exponen conceptos tales como apantallamiento electromagnético, requerimientos de espacio que deben ser considerados a la hora de la instalación del equipo y de la realización de las diferentes pruebas.

La seguridad en todo laboratorio es necesaria, pero cuando se involucran altos niveles de voltaje y energía, esta se hace imprescindible. Esto es el motivo por el cual aquí se discuten medidas de seguridad, aplicables no solo a un laboratorio de la prueba de impulso, sino a todo laboratorio de alto voltaje.

### **2.19.2 Generalidades**

En todo laboratorio donde se involucra energía eléctrica, se deben de adoptar medidas necesarias a fin de evitar riesgos y accidentes imprevistos. En un laboratorio de alta tensión en donde se manejan grandes cantidades de energía, lo que a su vez significa altos niveles de voltajes y de corriente, deben observarse las más estrictas medidas de seguridad, tales como la preparación del lugar de la instalación del equipo y normas de seguridad del laboratorio; otras en cambio serán especificadas por el fabricante del equipo generador de impulsos.

### **2.19.3 Requerimientos de espacio**

Las dimensiones del área de prueba son determinadas por los requerimientos de espacio del generador de impulsos y su equipo auxiliar, así como los requerimientos de espacio de los objetos a someterse a prueba.

Los requerimientos de espacio entre el equipo y las paredes y el cielo del laboratorio de alto voltaje se determinan en base al aislamiento que existe entre una barra metálica y un

plano de polaridad positiva. Objetos sobresalientes del lado de tierra de un tamaño moderado no reducen el voltaje de resistencia en forma significantes aunque se deben evitar tales objetos.

Estos requerimientos mencionados en el párrafo anterior, dependen del máximo voltaje de prueba. En la figura 4.23 se muestran distancias seguras típicas y se aplican en base a la distancia de una barra y un plano tierra.

Basándose en la figura 2.23, la Tabla 2.9 lista las mínimas distancias a las paredes para impulsos de rayo, para impulso de maniobra o conmutación negativos y positivos. Sin embargo es prudente aumentar en un 50% estas distancias por razones de seguridad

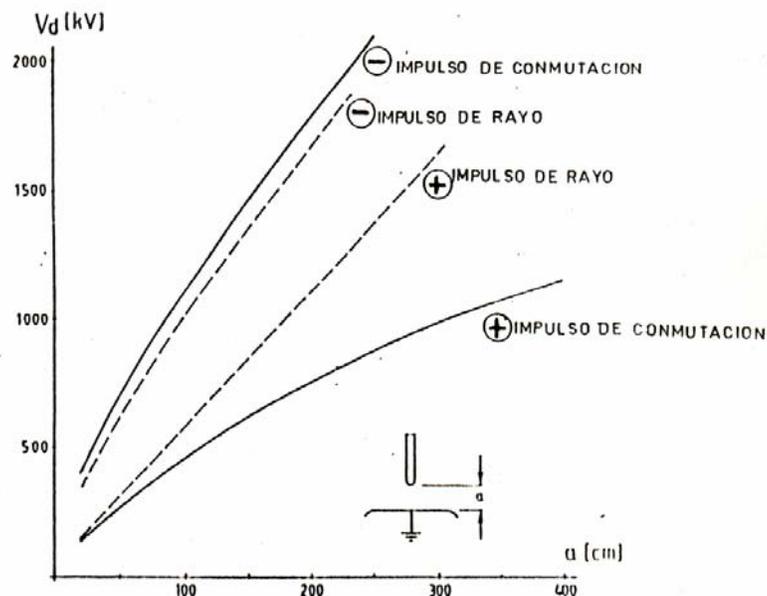


Figura 2.23. Voltaje de descarga de 50%  $V_d$  vrs la distancia  $A$  para varios tipos de voltaje de carga.

Tabla 2.9. Distancias mínimas entre el generador de impulsos y las paredes.

Voltaje de carga total (KV)	Numero de etapas	Altura (m)	Mínima distancia a las paredes W (m)
100	1	0.75	0.2
200	2	1.11	0.4
300	3	1.47	0.6
400	4	1.83	0.6
500	5	2.19	1.0
600	6	2.55	1.2
700	7	2.91	1.4
800	8	3.27	1.6

La figura 2.24, ilustra los requerimientos de espacio para el generador de impulsos. Puede usarse con los datos de la tabla 2.9, Se recomienda que no deban sobresalir objetos aterrizados dentro de los alrededores del generador. Esto se muestra por el área sombreada de la figura 2.24 Normalmente debe de haber mas espacio libre en la cima del generador, debido a que allí es donde se da el voltaje máximo. Esto es importante para una utilización óptima del espacio disponible.

Una aproximación, que se aplica a impulsos de rayo de ambas polaridades, así como para impulsos de maniobra o conmutación negativos, es la de tomar dos metros por cada 1000 KV(1 MV).

El espaciamiento de acuerdo a la figura 2.23 puede incrementarse para impulsos de maniobra o conmutación positivos por sobre 500 KV.

Los espaciamientos para los otros componentes a los cuales el impulso de voltaje se aplica, se determina de igual forma que para el generador de impulsos. Los componentes del sistema pueden tener espacios pequeños entre ellos, dependiendo de la medida en la cual ellos son similares en tamaño y en su distribución de voltaje vertical, lo cual evita el surgimiento de arcos imprevistos entre ellos.

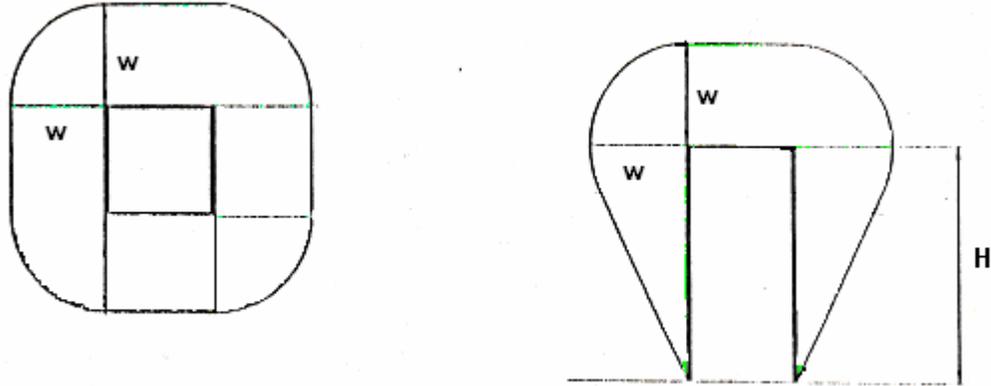


Figura 2.24. Requerimientos de espacio para el generador de impulsos

Además de las relaciones anteriores concernientes a los requerimientos de espacio, están disponibles varias ecuaciones para impulsos de maniobra o conmutación. Estas se muestran a continuación

$$L = (2V)^2 \quad \text{Ecu (2.18)}$$

Esta tiene la ventaja de la simplicidad pero conduce a espacios más pequeños para impulsos a voltajes abajo de 0.5 MV, los cuales no son correctos.

$$V = \frac{2.8}{(1+8/L)} \quad \text{o} \quad L = \frac{8}{(2.8/V - 1)} \quad \text{Ecu (2.19)}$$

La ecuación anterior presenta saturación, o sea que a voltajes más altos que 2.8 MV no se pueden alcanzar cual quiera que sea el espacio. Esto es físicamente incorrecto,

$$V = \frac{1.11L^{0.33}}{(1.31+2.11/L)} \quad L = 2.17(e^{1.13V} - 1) \quad \text{Ecu (2.20)}$$

Donde:

V: Voltaje máximo de prueba del generador (KV).

L: Espaciamiento requerido entre el generador y las paredes (mt).

Las ecuaciones anteriores, sin embargo, tienen una forma que parece razonable desde el punto de vista físico. Puesto que dan valores cercanos para los mismos espacios a voltajes de 0.5 MV y mayores. Podemos tomar el valor promedio de ambas como valor de espacio libre.

La relación entre el voltaje y los requerimientos de espacio se pueden describir por medio de una serie convencional:

$$L = AV + BV^2 + CV^3 \dots\dots\dots \text{Ecu (2.21)}$$

Donde:

A = 3.0	L : (mt)
B = -0.17	V : (KV)
C = 1.6	

Para mayor información ver referencia [6]

#### 2.19.4 Salón de alto voltaje

Se asume que un salón de laboratorio debería tener la forma de un paralelepípedo (caja de zapatos). Pero son posibles otros arreglos, por ejemplo Siemens tiene un salón en Berlín (Alemania) en forma de parábola como se muestra en la figura 2.25, curva (a).

Parece ser que donde se necesita mas espacio es en las dos terceras partes del salón hacia arriba, no en el nivel del piso. La curva c es una buena opción ya que presenta mayor espacio en la cima, pero hay muy poca espacio en la base de este arreglo y equipos muy grandes no pueden ser movilizadados tan fáciles dentro del laboratorio. Por tal razón puede ser que la caja de zapatos sea la mejor opción después de todo.

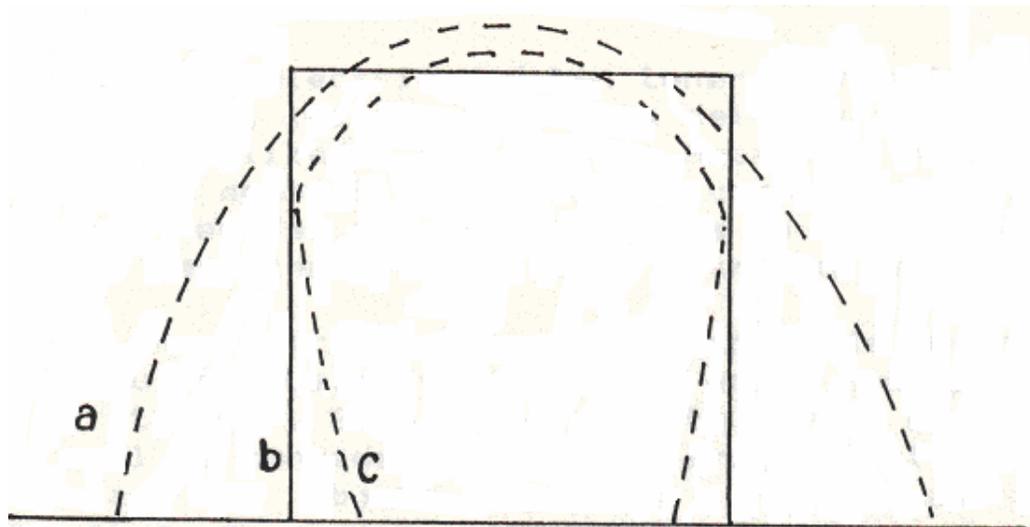


Figura 2.25. Tres formas diferentes de salones de alto voltaje

Un salón de alto voltaje tiene muchas características especiales, relacionadas al apantallamiento, aterrizamiento, retornos de tierra, atenuación acústica, Facilidades de transporte en el piso y en el levantamiento de equipo, aire acondicionado, etc.

#### 2.19.5 Apantallamiento electromagnético y retorno de tierra

Prácticamente todo laboratorio de alto voltaje moderno tiene algún tipo de apantallamiento electromagnético y alguna forma de reducir la impedancia de retorno de tierra.

El apantallamiento se utiliza para evitar la producción de disturbios producidos por las descargas del generador hacia el sistema de medición y también hacía el exterior del laboratorio.

El salón de alto voltaje debe tener un apantallamiento electromagnético, este puede obtenerse al embeber en las paredes del salón una malla metálica. Esta malla cubrirá las paredes y el cielo, mientras que en el piso se instala una malla de cobre expandida, la cual también sirve como retorno de tierra.

El cuarto de control debe tener un apantallamiento, y en las ventanas este se podría hacer con alambres embebidos, conectados a la estructura metálica. Los alambres pueden estar dispuestos en forma vertical por razones estéticas. Esto se justifica haciendo el siguiente experimento, coloque un lápiz en frente de sus ojos horizontalmente y verticalmente, mientras mira a un objeto distante con ambos ojos y al hacerlo verá la diferencia.

Los conductores eléctricos deben tener apantallamiento y cuando sea posible, localizadas fuera del apantallamiento de las paredes ó localizados en tubería metálicas abajo de la red del piso. El apantallamiento debe conectarse al de las paredes ó a la red del piso por lo menos en dos puntos y el mismo cuidado debe tenerse con otras estructuras metálicas.

Hasta los años cuarenta, la construcción de un circuito de prueba de impulso usualmente se basaba en el concepto de un punto de tierra. Este es el punto en el circuito de prueba el cual se considera como la tierra del sistema, por ejemplo la base del objeto de prueba. Y los demás objetos eran dispuestos de manera que sus conductores de tierra podrían ser dirigidos en forma radial hacia ese punto.

Preferiblemente, ese punto de tierra está también aterrizado, esto es, conectado a algo que se le pueda

considerar con potencial cero. Ha habido laboratorios y todavía existen en los cuales se ha tratado de distinguir diferentes sistemas de aterrizamientos, tales como la tierra del generador de impulsos, la tierra de la malla, la tierra de seguridad, etc. Todo esto trabaja bien, excepto posiblemente durante pruebas de impulso recortadas en el frente (frente de onda), durante la cual podrían existir pequeños disturbios inaceptables en la medición de corriente de neutro en transformadores, posiblemente causados por descargas entre diferentes partes de un sistema de tierra imperfecto. Esto se podría explicar de la siguiente manera:

Puesto que se conducen varios conductores de bajo voltaje del generador de impulsos hacia el cuarto de control (El generador tiene cables de alimentación y control, el divisor tiene su cable de medición y también el explosor tiene su cable de control, etc.); durante la liberalización del impulso, habrá una diferencia de voltaje entre diferentes puntos en el sistema de tierra, por ejemplo entre la base del generador y la del divisor. Estas diferencias serán llevadas vía los cables al cuarto de control donde pueden causar flameo ó aún daños.

Las diferencias de voltaje pueden ser reducidas, haciendo más pequeña la impedancia del sistema de tierra. El método más efectivo para esta reducción es tener retornos de tierra en forma de una placa de metal colocada sobre el suelo. Sí tiene que ser embebida en el concreto, se debe de usar una malla. La malla debe proveer conectores salientes del piso a intervalos accesibles.

#### **2.19.6 Seguridad en pruebas de alto voltaje**

Las normas y recomendaciones que deben observarse para la operación y realización de pruebas en un laboratorio de alta tensión con un alto grado de seguridad y que presentamos en esta ocasión, están basadas en la experiencia acumulada a lo largo de varios años en los laboratorios de alta tensión de la compañía GENERAL ELECTRIC.

El fin primordial de la observación de las normas y recomendaciones es la seguridad del personal encargado del laboratorio. Esto además debe complementarse con un programa eventual de capacitación para el personal del laboratorio, ya que la ausencia de accidentes en el laboratorio propicia el descuido y la consiguiente no observación de las normas y recomendaciones por parte de estos. El personal de laboratorio debe conocer en general como trabajan los dispositivos de seguridad instalados en el laboratorio, y

tener un amplio conocimiento de los procedimientos que deben seguirse para realizar las pruebas en alto voltaje, con un alto grado de seguridad. En la operación de un laboratorio de alto voltaje existen dos tipos de riesgos:

Los riesgos de tipo eléctrico los cuales a su vez se pueden subdividir en:

- a) Riesgos debidos a tensiones de estado estable.
- b) Riesgos debidos a impulsos de voltaje.

Los riesgos de tipo no eléctrico, son aquellos como el trabajar sobre grandes tanques de aceite abiertos, equipo de considerable altura y el levantamiento de materiales.

### 2.19.6.1 Protección contra riesgos eléctricos

#### I- Protección primaria (Circuito eléctrico de puerta)

Para prevenir riesgos eléctricos, todas las áreas de prueba en el laboratorio deben estar rodeadas por una malla metálica de 8 pies de alto debidamente aterrizada, la cual debe tener su respectiva puerta para el paso del equipo y del personal. A una altura media de la puerta se colocan dos conductores flexibles (que suministran 115 V), y equipados con conectares del tipo enchufar (plug-in), Estos conectores se colocan entre cada puerta y su malla adyacente. Con esto se evita el que una persona pueda entrar al laboratorio cuando el sistema esté energizado.

Una pequeña cantidad de potencia de prueba se puede tomar directamente a través del circuito de puerta, tal como se muestra en la figura 2.26. Para mayores requerimientos de potencia, se utiliza un sistema de relees y contactores, el cual se muestra en la figura 2.27.

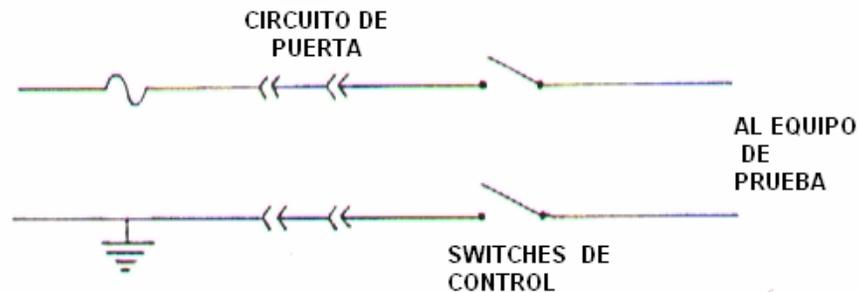


Figura 2.26. Circuito de seguridad para equipos de prueba con bajos requerimientos de potencia.

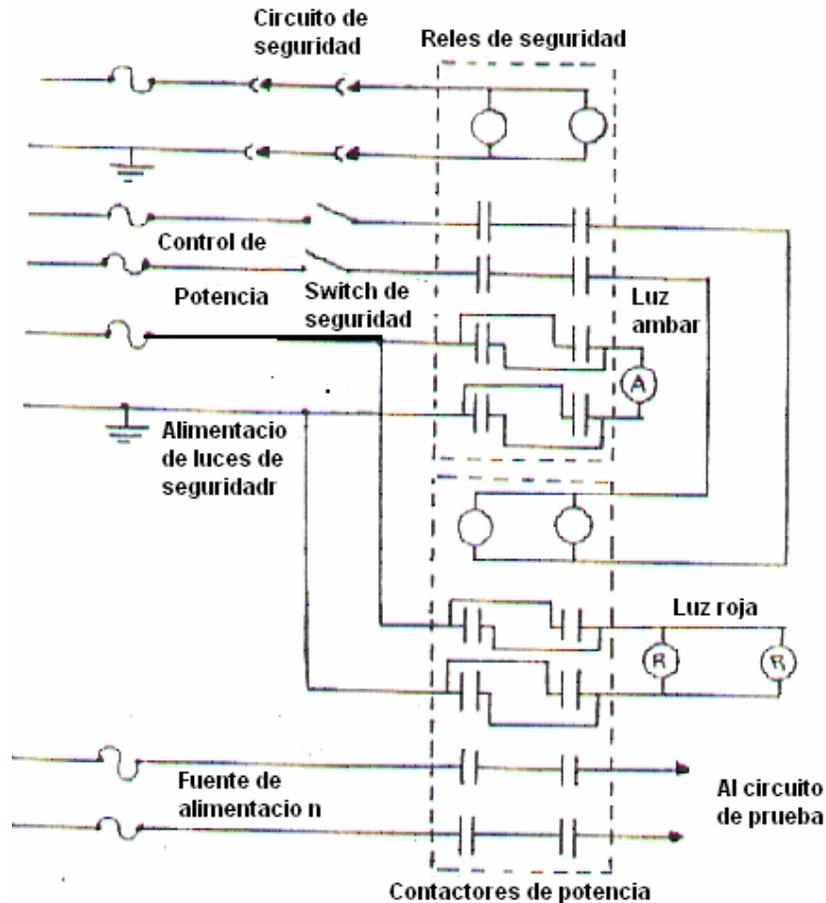


Figura 2.27. Circuitos de seguridad utilizando contactores y relees para equipo de prueba con requerimientos de potencia moderados.

El circuito de puerta, por lo tanto, gobierna la operación segura en un área y su funcionamiento debe ser tal que garantice la operación no errónea de los dispositivos de seguridad.

## II- Contactos y relees de seguridad

Las características de seguridad del circuito de puerta simple de la figura 2.26, son evidentes porque la potencia del sistema de prueba se interrumpe al abrir el circuito de la puerta. Cuando se usan contactores se requieren medidas de seguridad adicionales debido a la pasible falla de estos dispositivos. Como antes, se utiliza el circuito de puerta,

solo que esta vez en lugar de alimentar directamente al equipo de prueba del laboratorio, energiza las bobinas de dos relees auxiliares conectados en paralelo. Los contactos de estos relees están en serie con las bobinas de los contactores, los cuales alimentan el equipo de prueba, como se muestra en la figura 2.27.

Un set de luces indicadoras deben colocarse en cada puerta; estas pueden indicar fallas en el sistema de seguridad, ó en el sistema de potencia. La luz de color AMARILLA indica que todas las puertas de acceso a un área están cerradas y la luz roja indica que los contactos de los contactores que alimentan el equipo se han cerrado y que la prueba se está desarrollando.

Cuando los contactos del rele se han "pegado", esto se detecta porque la luz amarilla permanece encendida cuando la puerta está abierta y cuando son los contactos del contactor los que se han "pegado", esto se detecta cuando la luz roja permanece encendida después que el switch de control o la puerta se ha abierto. Es evidente que cuando se da una de estas fallas la prueba se detiene inmediatamente y no se reanudará hasta que el problema se halla solventado.

### **III- Circuit breakers y switches de desconexión**

Se requieren circuit breakers para controlar relativamente grandes bloques de potencia usadas en pruebas de alto voltaje de 60 Hz. Para esto se utiliza un circuito de seguridad similar al sistema de dos contactores mostradas en la figura 2.27. Sin embargo esto puede requerir el uso de dos breakers y puede resultar caro. Para reducir los costos se emplea un breaker y un switch de desconexión. El switch de desconexión se instala cerca del área de la puerta y está conectado mecánicamente con ella de tal forma que el switch solamente puede cerrarse cuando la puerta está completamente cerrada, y la puerta a su vez no puede abrirse hasta que el switch esté abierto. El switch de desconexión se instala de tal forma que pueda ser visto por el operador, así, de un vistazo él puede estar seguro de que el sistema no está energizado cuando él entre al área de prueba.

Se provee además de un encerramiento eléctrico para asegurar que el switch de desconexión se cierra antes que el breaker, y el breaker se abre antes que el switch de desconexión. Al igual que en el caso de la aplicación de contactores, se utilizan relees controlados por el circuito de puerta para controlar la potencia suministrada a las bobinas del circuit breaker. De nuevo el sistema de luces amarilla y roja provee una indicación visual de la operación del circuito

de seguridad y del circuit breaker. Este sistema trabaja bien con áreas que tienen una sola puerta de acceso. Para áreas que tengan más de una puerta, switches con encerramiento mecánico entre ellos, debe instalarse en cada puerta. Sin embargo esto puede resultar caro y los grandes cables de conexión que pueden necesitarse, provocan interferencias con la prueba particularmente si el área es grande y las puertas están bastante separadas. En tales casos se recomienda un switch de desconexión operado por motor. Este está eléctricamente enclavado con el circuito de puerta por medio de un doble rele de seguridad con las bobinas conectadas en paralelo y los contactos en serie, tal como se explicó anteriormente. De nuevo el switch de desconexión se coloca de tal forma que pueda ser visto fácilmente por el operador antes de que él entre al área de prueba.

#### IV- Encerramiento de Áreas de prueba

Una de las reglas primordiales en pruebas de alto voltaje es el nunca interconectar conductores de un área de prueba a otra sin precauciones especiales. Para cumplir con este requisito de una manera segura, los circuitos de puerta de las dos áreas tienen enclavamiento entre ellos tal como se muestra en la figura 2.28.

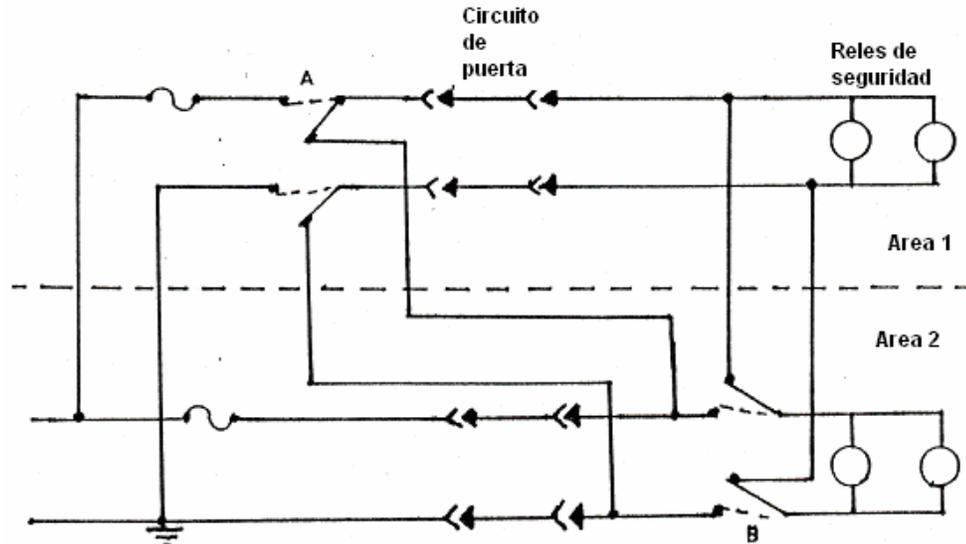


Figura 2.28. Interbloqueo de dos áreas para operar como un área con las posiciones del switch como se muestra con las líneas sólidas en A y B. Las líneas punteadas indican operaciones independientes de las áreas.

El switch maestro cuando está en su posición correcta, conecta los circuitos de puerta de las dos áreas en serie, conecta todos los relees de seguridad de ambas áreas al final de los dos circuitos de puerta que están conectados en serie y además conecta las luces auxiliares de las dos áreas en paralelo. Así, al abrir una puerta en cualquiera de las dos áreas se interrumpe el suministro de energía en ambas áreas.

No debe autorizarse el acceso al personal encargado de realizar la prueba, mientras el sistema de encerramiento no halla sido debidamente probado, para una operación apropiada, por personal capacitado. Después de realizada esta prueba ya pueden colocarse, en caso que se necesite, cables de interconexión de las áreas y el personal capacitado deberá revisar cada una de estas conexiones, antes de que se energice el laboratorio.

Una vez concluida las pruebas con las áreas interconectadas, el encerramiento solo puede removerse cuando el personal capacitado tenga la seguridad de que ya no existe interconexión entre las áreas.

#### **V- Seguridad dentro de las áreas de prueba**

En un laboratorio donde solo un área de prueba se está utilizando y solo están trabajando una ó dos personas, los circuitos de seguridad descritos hasta el momento prevén una protección completa porque estas personas son mutuamente responsables la una de la otra y sabrán toda el tiempo si el área esta o no lista para realizar una prueba.

El problema llega a ser más complicado cuando están involucradas muchas áreas de prueba y varias personas, quienes tienen que transitar entre distintas áreas, para realizar su tarea. Es obvio que los circuitos de seguridad de puerta no pueden proteger a una persona una vez que ésta dentro del área de prueba no visible para el operador del sistema de control. Para enfrentar este problema se establece una estricta exclusión de todo el personal de aquellas áreas que no sean su propia área de trabajo. Los nombres de los operadores se colocan en la puerta de acceso a cada área. Los operadores tienen libre acceso a áreas todo el tiempo pero son mutuamente responsables unos de otros y deben percatarse de que no hay ningún miembro de su equipo dentro del área de prueba. Cualquier otra persona tiene prohibido ingresar a un área de prueba a menos que sea escoltada por un miembro del equipo, ó bien que se tenga la seguridad de que el área de prueba esté completamente desenergizada, el equipo aterrizado, y un rótulo de

advertencia "NO OPERAR", se coloque en cada puerta de acceso.

Dentro de las áreas de prueba debe darse atención al equipo de prueba específico. El generador de impulsos y los generadores DC con sus bancos de capacitores son especialmente peligrosos si no son debidamente protegidos. Se localizan swítches de tierra operados por solenoides en el lado de salida del alto voltaje del rectificador utilizado para cargar el generador. Estos switches de tierra se abren para remover la conexión a tierra del rectificador en el comienzo del ciclo de carga. Cuando el generador se desenergiza, ya sea desde el panel de control, ó al abrirle una puerta, los swítches de tierra se cierran por acción de la gravedad descargando así los capacitores del generador. Esto es, los capacitores se descargarán suponiendo que las resistencias de carga entre los capacitores están en perfectas condiciones. Como esto no siempre se cumple el personal del laboratorio debe tener la precaución de conectar a tierra todos aquellos dispositivos susceptibles de conservar carga. Tal aterrizaje se realiza con barras de tierra las cuales consisten de un gancho colocado en la punta de un polo aislado, el gancho está conectado a tierra a través de un cable de cobre trenzado, así el personal del laboratorio no tiene que tocar el conductor de tierra.

Se deberían proveer barras de tierra similares en la base de cada generador de impulso, así el banco de capacitores puede aterrizararse cuando sea necesario trabajar cerca de este. En la puesta de capacitores a tierra debe de tenerse cuidado especial cuando se descargan capacitores conectados en serie. La práctica más segura es conectar a tierra cada uno de los terminales de cada capacitor.

En generadores de impulso de gran capacidad, del orden de 5,000 Kv, se disponen tiras de acero con contactos accionados por un mecanismo externo para conectar los capacitores a tierra.

En generadores de impulso de menor capacidad se monta un dispositivo en cada capacitor y de tal forma arreglado que un mecanismo central cortocircuita cada capacitor. Siempre que una persona deba trabajar sobre el generador mismo este dispositivo se utiliza para cortocircuitar y poner tierra, cada capacitor.

Siempre que una persona trabaje en un área de prueba es obligatorio que esté presente otra persona ya que en caso de que la persona que se encuentre trabajando sufra algún daño, la otra persona pueda auxiliarlo o bien pedir ayuda.

## VI- Medición, control y circuitos de medición

Los cables de conexión no deben extenderse hacia fuera del área de prueba, a menos que estén confinados en una canalización debidamente aterrizada y protegidos en sus terminales por un empaque protector. Los cables del medidor y los cables de deflexión que llegan hacia el osciloscopio están dentro de la categoría mencionada. Los voltímetros y otros instrumentos, los cuales regularmente se cambian, se colocan en compartimientos de metal con una ventana de vidrio.

Cuando una fuente de alimentación proporciona energía a más de un área existe el riesgo de que se produzcan sobretensiones peligrosas de un área a otra. Para prevenir esto se aterriza sólidamente un lado del circuito y se protege el otro lado con resistencias THYRITE<sup>11</sup>, tanto en el transformador de suministró, como en cada área. Las resistencias se conectan directamente a la línea y demandan solo unos pocos miliamperios a voltaje normal. La característica no lineal de estas resistencias previene una excesiva caída de voltaje aún cuando descarguen cientos de amperios.

De igual forma, las resistencias THYRITE se utilizan en los circuitos de control, tanto en el área de prueba, como también en la estación de control.

Más que por razones de seguridad, las luces del área se protegen con resistencias THYRITE para que no se dañen por los efectos de las altas corrientes de sobretensión durante la descarga del generador de impulsos.

## VII- Etiquetas de seguridad

En laboratorios de alta tensión se utilizan ETIQUETAS rojas cuadradas para indicar que es permitido el acceso de una persona al área de prueba y para advertir que el equipo de prueba no debe energizarse hasta que la marca haya sido retirada. Es responsabilidad de la persona que ha colocado las etiquetas asegurarse de que todos los switches están abiertos, los terminales de alto voltaje de los transformadores estén aterrizados y los capacitores de generadores de impulso cortocircuitados y aterrizados, antes de que la marca de seguridad pueda removerse. Es además responsabilidad de la persona que coloca las etiquetas asegurarse que las razones por lo cual se colocaron no

---

<sup>11</sup>-Este tipo de resistencias son fabricadas por la compañía GENERAL ELECTRIC.

existen y además que no se encuentre ninguna persona en el área de prueba antes de que las etiquetas se retiren.

#### **VIII- áreas de seguridad temporales**

Ocasionalmente, es necesario utilizar encerramientos temporales. Si no hay manera de hacer el trabajo en un área de prueba permanente, puede arreglarse un área de prueba temporal. Pueden acoplarse secciones portables de malla, equipadas con circuitos de puerta, para tener así un área cerrada. La aprobación por parte del personal capacitado se requiere antes de que tal área sea puesta en uso.

En unos pocos casos donde resulta impracticable usar secciones de malla se pueden obtener áreas temporales de trabajo usando una cinta con rayas rojas y blancas y colocar rótulos con el mensaje "peligro alto voltaje", en la cinta. A ninguna persona se le permite el rodeo proporcionado por la cinta hasta que la prueba se ha completado y la fuente de alimentación se ha desconectado. Tales áreas temporales se utilizan al, mínimo y se usan generalmente para mediciones de relativo bajo voltaje.

#### **IX- Conexiones a tierra de baja impedancia**

En un laboratorio de alto voltaje, la tierra y las conexiones a tierra deben ser de baja inductancia y de baja resistencia. Toda la armazón de acero del laboratorio, en las paredes y en el piso hace posible obtener conexiones a tierra de baja impedancia, en las paredes, el techo, y el piso. La malla del piso se construye de canales de acero invertidos y soldados con la malla de refuerzo del piso. Esta armazón se rodea con cable de 500,000 circular-mil, conectado a la estructura de acero de la construcción y a 16 varillas de 10 pies de longitud enterradas en el suelo. Muchos tubos los cuales se encuentran en los alrededores de la construcción constituyen un contacto adicional de baja impedancia hacia la red de tierra.

#### **X- Técnica de aterrizamiento**

El generador de impulsos de alto voltaje requiere considerable espacio y las áreas de prueba deben ser amplias. Las corrientes especialmente cuando el objeto de prueba es perforado son altas y tienen frentes de subida

tales que pueden darse caídas de voltaje de muchos Kilovoltios en los cables que conducen estas corrientes. El personal nuevo debe ser capacitado con conocimientos de técnicas de aterrizamiento para asegurarse que las conexiones a tierra de todos los dispositivos en el área de prueba no conducen algunas de las corrientes de impulso, las cuales fluyen en el conductor de tierra, el objeto bajo prueba y el generador de impulsos.

La misma precaución es necesaria para trabajar en pruebas de alto voltaje con transformadores, los cuales tienen una capacitancia distribuida entre el conductor de alto voltaje y el tanque aterrizado,

#### **2.19.6.2 Protección contra riesgos no eléctricos**

Hay varios riesgos de tipo no eléctrico los cuales merecen una atención especial. Muchas de las pruebas de alto voltaje se realizan sobre equipos los cuales se encuentran sumergidos en grandes tanques de aceite. Frecuentemente los tanques se destapan en su parte superior para propósitos de ajuste y de observación. La gente que realice tareas en los bordes del tanque debe tener gran cuidado ya que la densidad del aceite no es suficiente como para que una persona flote. Para prevenir el que alguna persona caiga dentro del tanque, se utiliza un arnés, el cual esta asegurado con cuerdas resistentes al techo del laboratorio, de tal forma que si una persona cayera, su cabeza y hombros no se sumergirían en el aceite.

Ocasionalmente es necesario suspender componentes del circuito de alto voltaje del techo ó de las paredes por medio de cuerdas. Si se produce efecto corona en el punto donde la cuerda esta sujeta al componente del circuito, la cuerda puede romperse, Para evitar este riesgo se insertan barras o tubos aislantes entre los componentes del circuito y las cuerdas. La longitud de las barras o tubos dependerá de la magnitud del voltaje involucrado.

Para el trabajo que deba realizarse en la parte superior de generadores de impulsos ó sobre circuitos de prueba elevados, se utilizan sillas colgantes con cinturones de seguridad.

Cuando se trata de alturas moderadas se utilizan andamios de metal equipados con ruedas, los cuales pueden moverse de un lugar a otro. Esto tiene la ventaja de mayor estabilidad y más libertad de trabajo que con grandes escaleras.

Para mover equipo y materiales se utilizan ascensores de vagones y grúas.

#### **2.19.7 Protección de daño a los oídos**

Para prevenir un daño posterior en los oídos por causa del ruido producido, se hace necesario el uso de dispositivos de protección de estos en la zona de control, particularmente cuando se aplican pruebas recortadas, Aunque lo recomendable es utilizar siempre la protección de los oídos aun cuando la forma de onda no es recortada.

#### **2.19.8 Prevención de daños a los ojos**

Deben utilizarse anteojos de protección si hay riesgo de que un dispositivo sometido a prueba explote, cuando no es posible observar la prueba desde el cuarto de control.

## CONCLUSIONES DEL CAPITULO II

Creemos que hemos logrado nuestro objetivo de exponer brevemente algunos conceptos generales relacionados a la prueba impulso. Por medio de la cual se simulan disturbios presentes en las redes eléctricas relacionados a sobrevoltajes externos (rayos) e internos.

Las formas de onda obtenidas en forma experimental en el laboratorio, deben apegarse a las correspondientes formas de onda estándar o por lo menos estar dentro de los rangos de variación que aquí se han presentado, para que la prueba impulso realizada se apegue a las normas establecidas para este fin.

Para generar la onda de la prueba impulso es necesario conocer su valor de cresta por la cual es necesario conocer el BIL del elemento a probar ya que este es el que lo determina.

Como en nuestro país los niveles de voltaje son menores a los 300 KV, la prueba impulso de conmutación se satisface si el elemento sometido a esta prueba da resultados satisfactorios a la prueba de un minuto a la frecuencia del sistema.

El generador de impulsos utilizado en un laboratorio en particular dependerá de la clase de demanda que este pueda tener (diferentes objetos de prueba podrían ser ensayados), ya que se tienen que tomar en cuenta ciertos parámetros como la energía del generador, el nivel de voltaje máximo de generación, etc.

La consideración de las condiciones atmosféricas, Son importantes en la realización de las pruebas impulso, por lo tanto, debe de tenerse un especial cuidado de incluirse esta consideración cuando se lleven a cabo

La onda de impulso de rayo y la de maniobra quedan definidas por tres parámetros: tiempo de frente (tiempo de cresta), tiempo de cola y voltaje de cresta. Para la generación de tales impulsos por medio del circuito propuesto por Emil Marx, debe jugarse con los valores de capacitancias y resistencias que forman el circuito. Debe mantenerse una correlación entre los diferentes valores a fin de generar impulsos dentro de las tolerancias especificadas por los estándares.

La eficiencia del generador de impulsos, depende tanto de la capacitancia del generador como la del objeto bajo prueba

y la primera a su vez dependerá de la conexión utilizada para este.

Cuando se requiera impulsos de conmutación no se debe limitar, su producción a un generador de impulso, sino que existen otras formas convenientes de obtenerlos, tales como circuitos con transformadores de prueba de alto voltaje y bancos de capacitares.

En lo que se refiera al sistema de medición, se debe tomar muy en cuenta los elementos que lo conforman y la disposición que estos pueden tener; ya que algunas veces se presentan errores en la medición que podrían afectar la evaluación de la prueba. Para poder distinguir y minimizar este tipo de errores se debe hacer un estudio sobre el sistema de medición.

Para poder realizar el ensayo de la prueba de impulso en forma eficiente, se debe contar con un laboratorio moderno, que contenga el equipo mínimo necesario. En este capítulo se ha presentado un detalle de lo que debería conformar el laboratorio de la prueba de impulso.

Para medir voltajes impulso por medio de explosores de esferas deben considerarse las condiciones atmosféricas en el momento de realizar la medición. Además debe considerarse la distancia del explosor a las paredes, techo y el piso del laboratorio, a fin de evitar un flameo imprevisto.

Los requerimientos de espacio en un laboratorio de alto voltaje son factores críticos, y la no consideración a la hora de realizar las pruebas podría producir descargas no deseadas de partes del circuito de impulso a paredes y pisos.

Se debe seguir todas las normas de seguridad es indispensable en un laboratorio de alto voltaje; se deben de tener medidas de seguridad eléctricas y mecánicas para prevenir el acceso de personal al área de pruebas.

Es imprescindible que lo dicho en el párrafo anterior se cumpla en su totalidad, ya que de ella depende la seguridad y el buen funcionamiento del laboratorio.

## REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- [1]- International Electrotechnical Commission IEC.  
Publication 60.1. High Voltage Test Techniques  
Part 1: General definition and test  
requirements  
Second edition 1989.
- [2]- IEEE Standar Techniuee for High-voltage testing.  
IEEE Std 4-1978. Sexta Edición 1977.
- [3]- International Electrotechnical Commission IEC.  
Publication 60.2. High Voltage Test Techniques  
Part 2: Test procedure.  
Suiza. Primera Edición 1973.
- [4]- International Electrotechnical Commission IEC.  
Publication 60.3. High Voltage Test Techniques  
Part 3: Measuring devices  
first edition 1976.
- [5]- Escobar Arévalo, José Domingo y otras  
" Diseño de un generador de impulsos"  
Tesis para optar al grado de Ingeniero  
Electricista.  
Universidad Centroamericana "José Simeón Cañas"  
UCA. 1986
- [6]- Nils Hiltén-Cavallius  
High Voltage Laboratory Planning  
Basel Suiza. Publicado por High Voltage Test  
System ASEA HAEFFELLY 1986.
- [7]- Ing. José Fredy Villalta  
Apuntes para el curso "Redes de tierra"  
UES El Salvador
- [8]- Passoni & Villa,  
Boletín "Impulse Generator"  
Milano-Italia GTN Mayo 1981
- [9]- Ing. Cuadra  
"Información sobre las características de los  
sistemas eléctricos de media tensión"  
CAESS San Salvador

[10]- Ing. Chevez Paz  
Apuntes para el curso "Coordinación de aislamiento I  
y II"  
UES El Salvador

[11]-



**ELECTROPORCELANA GAMMA S.A.**

**Certificada ISO 9002 – ISO 14001**

---

"Guia para mejorar el comportamiento bajo descargas  
tipo rayo de las líneas aéreas de distribución  
eléctrica norma IEEE Std 1410".

Boletín 43- Enero - Marzo 2002  
Sabaneta-Colombia

[12]- Amendment to IEEE Standard  
Techniques for High Voltage Testing  
IEEE Std 4a-2001  
Approved 17 march 2001.

[13]- Osbaldo Adolfo Campos Miranda  
Jorge Alberto Galdamez García  
"Generador de Impulsos de Alto  
Voltaje Aplicaciones Industriales y  
Manual de Operación"  
Tesis para optar al grado de Ingeniero  
Electricista.  
Universidad de El Salvador  
Enero 1991

## CAPITULO III

### LABORATORIO DE LA PRUEBA DE IMPULSO EXISTENTE

#### Introducción

Para poder realizar la prueba de impulso antes debe adquirirse algún grado de familiaridad con el laboratorio de la prueba de impulso disponible, tanto en la que se refiere a las instalaciones, así como también en lo referente a las características del equipo de laboratorio.

Este capítulo se inicia presentando las características especiales que posee el edificio del LABORATORIO DE POTENCIA de la Escuela de Ingeniería Eléctrica, en donde se ha instalado el equipo. Se prosigue entonces describiendo el laboratorio presentando en un diagrama de bloques la interrelación que se da entre los diferentes equipos: generador de impulsos, capacitor de carga/divisor, espinterometro de medición, consola de mando, osciloscopio y compresor.

También se presenta el procedimiento desarrollado para la rehabilitación del equipo de alto voltaje, reparación, cambio de elementos, mediciones etc., de cada una de las piezas que componen el generador de alto voltaje.

Para terminar se realiza una descripción de las características de funcionamiento propias de cada uno de los equipos, presentando además los posibles objetos a someter a prueba y las limitantes que presenta el laboratorio en este momento.

#### 3.1 El lugar de la instalación

El equipo existente para la realización de la prueba de impulso se encuentra instalado en el ala izquierda del edificio del LABORATORIO DE POTENCIA DE LA ESCUELA DE INGENIERIA ELÉCTRICA. La otra ala está destinada para la instalación, de un laboratorio para realizar las pruebas de corto circuito, rotor bloqueado con la maquina universal así

como también pruebas con el autotransformador trifásico y laboratorios de instalaciones eléctricas.

El edificio posee características especiales tales como:

- EL BLINDAJE ELECTROMAGNÉTICO. Este consiste de una malla metálica embebida en las paredes del edificio debidamente aterrizada.
- LA MALLA DE TIERRA. Con esta se hace contacto a través de puntos distribuidos en el piso del laboratorio.

Estas dos características juntas le dan al laboratorio la característica de ser una JAULA DE FARADAY, con lo que se evita la interferencia eléctrica y electromagnética a la sala donde se encuentra el equipo de medición y control. Para ambas salas se dispone de un segundo nivel, ubicado en la sala de control, desde donde puede observarse la realización de la prueba. Una vista de la distribución en planta del equipo existente se muestra en la figura 3.1.

La cortina metálica es la entrada a la sala del objeto a ser sometido a prueba. Esta se encuentra cerca de uno de los nuevos portones de acceso a la Universidad, lo que facilitaría el acceso del equipo.

Al lugar donde está instalado el equipo le hacen falta algunas medidas de seguridad, que debe poseer el laboratorio según se especificó en el capítulo II. Entre las medidas básicas de seguridad que es necesario tomar están:

- Instalar una puerta en la entrada de acceso al laboratorio, la cual debe ir dotada de un switch o una chapa eléctrica la cual no permita que se energice el laboratorio cuando esté abierta.
- Instalar a la entrada del laboratorio un par de luces que indiquen cuando se realiza y cuando se finaliza la prueba. Para indicar que se está realizando la prueba puede encenderse una luz roja. Para indicar cuando se ha terminado la prueba puede encenderse una luz verde.
- La instalación de los vidrios de protección en la sala de observación, las orejeras, lentes para la vista etc.

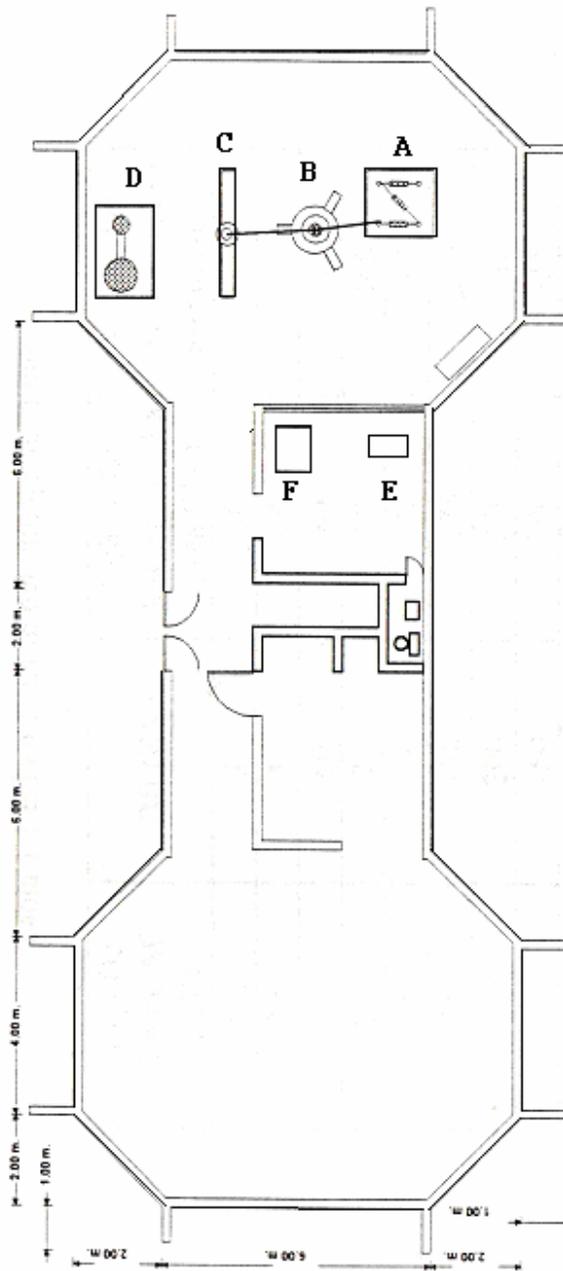


Figura 3.1 Distribución en planta del equipo existente en el laboratorio de potencia.

Donde:

- A Generador de impulsos
- B Capacitor de carga / divisor
- C Objeto bajo prueba
- D Espinterometro de medición
- E Compresor
- F Consola de mando

### 3.2 Descripción del laboratorio

El equipo existente para la realización de la prueba de impulso consiste de:

- Generador de impulsos
- Capacitor de carga/Divisor
- Espinterómetro de medición
- Consola de control
- Osciloscopio
- Compresor
- Objeto bajo prueba

Un diagrama de bloques del laboratorio se muestra en la Figura 3.2.

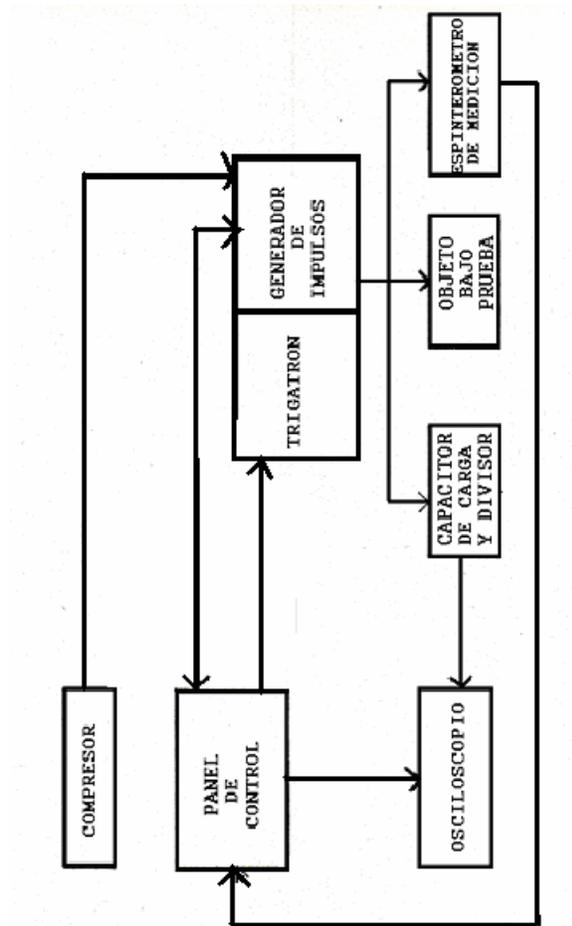


Figura 3.2. Diagrama de bloques del laboratorio de la prueba de impulso existente

### **I- El compresor:**

Este suministra la presión de aire necesaria (4.5/6 bars) o (65/85 Psi), para accionar el dispositivo de puesta a tierra instalado en el generador.

### **II- La consola de control:**

Desde esta se realizan las funciones de:

- Puesta a tierra de la instalación.
- Ajuste y medición a distancia del espacio existente entre los explosores de cada una de las etapas del generador.
- Ajuste, medición e indicación de la polaridad, del voltaje de carga del generador.
- Ajuste y medición de la distancia entre las esferas del espinterómetro de medición.
- Haciendo uso de un circuito electrónico especializado, el cual se conoce como TRIGATRON, se proporciona el pulso de disparo para el osciloscopio y para el generador de impulsos.
- Control y fijación del número de impulsos consecutivos que el generador puede producir secuencialmente. Esto vendrá determinado por el valor de voltaje de carga y por la capacidad térmica de las resistencias.

### **III- El osciloscopio:**

Este permite apreciar la onda de impulso de tensión, o la onda de corriente asociada a aquella, reteniendo la señal en la memoria.

### **IV- El capacitor de carga/divisor:**

Este proporciona una muestra reducida de la onda de voltaje producida por el generador, de tal forma que puede ser manejada por un osciloscopio adecuado.

## V- El espinterómetro de medición:

Con el auxilio de tablas de datos adecuadas permite medir el voltaje pico de la onda de impulso de tensión (Ver sección 2.18.1)<sup>12</sup>.

En las páginas siguientes se presentaran las características propias del equipo que conforma el laboratorio de la prueba de impulso.

### 3.3 El generador de impulsos

En este bloque se incluye el generador de impulsos y su equipo auxiliar, así como también el generador de voltaje DC necesario para cargar cada una de las etapas del generador. Este se muestra en la figura 3.3.

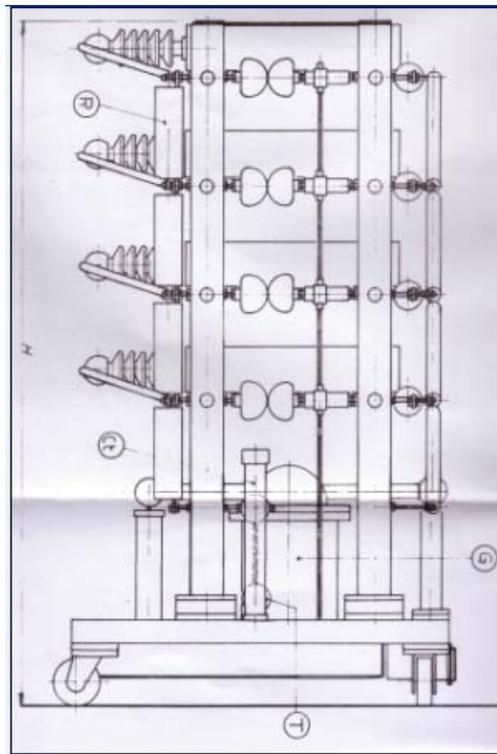
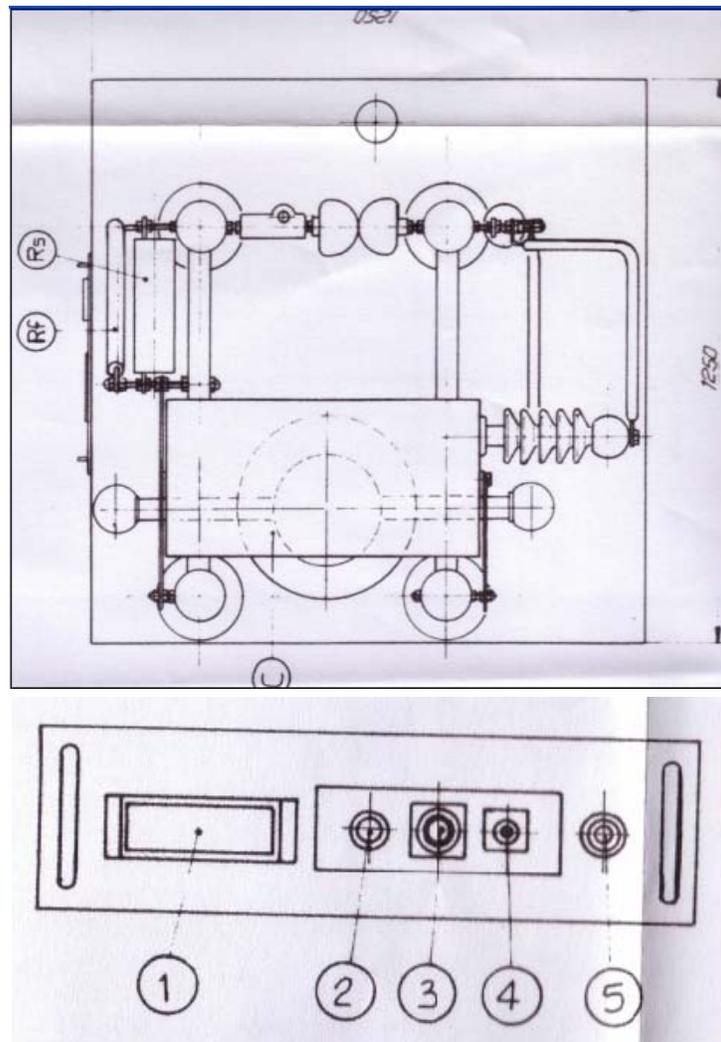


Figura 3.3. Vista del generador de impulsos con sus etapas

---

<sup>12</sup> Esta información ha sido tomada del manual de laboratorio proporcionado por PASSONI Y VILLA, ver referencia [1].



Donde:

- G : Generador
- R : Resistencia de carga
- T : Dispositivo de tierra
- C<sub>t</sub>: Capacitor trigatron
- C : Capacitor
- R<sub>f</sub> : Resistencia de frente
- R<sub>s</sub> : Resistencia de cola
- 1 : Conector multipolar de servicio auxiliar
- 2 : Conector trigatron
- 3 : Regulación de los explosores
- 4 : Conector de medición
- 5 : Conector de aire comprimido

Figura 3.3. Continuación

### 3.3.1 Generador de impulsos

El generador de impulsos que posee la Escuela de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de El Salvador es del tipo GTS, fabricado por PASSONI & VILLA, y tiene las siguientes características técnicas:

- Tensión nominal de carga	400 KV DC
- Energía nominal	10 KJ
- Numero de etapas	4
- Tensión de carga por etapa	100 KV
- Ritmo entre impulsos	30 s
- Inductancia del generador	40 $\mu$ H
- Condiciones ambientales permisibles:	
Temperatura	0 a 40 °C
Humedad relativa	35 + 95%

El generador de impulsos ha sido diseñado para generar la onda estándar "Lightning Impulse" de 1.2/50  $\mu$ s de acuerdo a las normas establecidas para objetos bajo prueba cuya capacitancia a tierra esté en el rango hasta de 8500 pF, utilizando para ello la conexión adecuada. Esto se explicara en detalle posteriormente.

Disponiendo de un juego de resistencias adicionales, los cuales pueden adquirirse opcionalmente, el generador también puede producir la onda estándar " Switching Impulse" de 250/2500 $\mu$ s<sup>13</sup>.

El generador tal como ha sido suministrado por el fabricante consta de las siguientes partes:

#### 3.3.1.1 Plataforma metálica con ruedas

En esta plataforma se encuentran montados dispositivos auxiliares para el control a distancia del generador desde el banco de mando. Estos se detallan a continuación:

---

<sup>13</sup> En este país esta prueba no es necesaria, a menos que se especifique, pues se realiza para voltajes de transmisión en un rango superior a 300 KV, según lo especifica la referencia [2]. En su lugar se hace la prueba de un minuto a la frecuencia de la red, ver capítulo II.

**a) Motor de doble sentido de rotación**

Este sirve para regular el espaciamiento entre los explosores de esferas de cada una de las etapas del generador, al accionar un sistema de transmisión de árbol giratorio y de engranajes el cual permite el desplazamiento sobre el eje horizontal del hemisferio móvil de cada uno de los explosores en forma sincronizada.

**b) Transductor de rotación**

Este está acoplado al motor de doble sentido de rotación cumple la función de transmitir hacia el banco de mando la indicación de la distancia entre los hemisferios de los explosores de las etapas.

**c) Dispositivo de seguridad**

Este es un dispositivo neumático para poner a tierra toda la instalación, que posee comando de bloqueo para evitar la conexión del transformador de alta tensión cuando el divisor está cerrado. Consiste de:

- Un cilindro de aire neumáticamente operado.
- Un tanque con capacidad de 5 litros.
- Un switch detector de presión mínima.
- Un set de electroválvulas para el control.

Para la operación de este dispositivo se requiere de compresor con una capacidad de 4.5/6 bars de presión.

El dispositivo puede activarse manualmente desde el banco de mando pero se activará automáticamente cuando:

- Se abre el circuito controlado por la puerta de acceso
- Falla el voltaje de alimentación
- La presión de aire cae abajo del nivel mínimo permisible

Cuando el dispositivo de seguridad se activa los capacitores se descargan con una constante de tiempo de algunas décimas de milisegundos. Ambos electrodos de los capacitores son aterrizados. El bushing de alto voltaje se aterriza a través de los resistores de carga, la carcasa metálica a través de resistencias de cola.

**d) Amplificador final de impulso (FTR)**

Este recibe la señal de disparo proveniente del dispositivo electrónico de precisión (ETR) y la acopla por medio de la resistencia de amortiguación hacia el condensador trigatrón, el cual lo transmite al hemisferio del explosor de la primera etapa.

#### **e) Alarma**

Esta es operada ya sea desde el banco de mando, o bien se activará al abrir la puerta de acceso al laboratorio, o al presionar el pulsador de emergencia ubicado en el banco de mando.

#### **f) Placa de conectores**

Esta placa aloja los conectores hasta donde llegan los diferentes cables que transmiten señales de medición, control entre el generador y el banco de mando.

Estos conectores se muestran en la figura 3.3, y se detallan a continuación:

**1-Auxiliar service multipolar:** Este aloja el conectar multipolar el cual contiene el cable que transmite señales de control para servicios auxiliares al generador de impulsos.

**2- Trigatron connector:** En este se conecta el cable que transmite la señal de disparo para el generador de impulsos, la cual es generada en el dispositivo trigatrón ubicado en la consola de control.

**3- Spark gap regulation:** En este se conecta el cable a través del cual se transmiten señales de medición y control de la distancia entre los hemisferios de los espinterómetros de las etapas del generador.

**4- Measuring Connector:** En él se conecta el cable que transmite hacia el banco de mando una medida del voltaje de carga del generador, la cual es realizada por la resistencia de medición.

**5- Compressed air connector:** Aquí se conecta una manguera flexible que transmite la presión de aire proveniente del compresor.

#### **3.3.1.2 Estructura aislante**

La estructura aislante está conformada con postes de polipropileno colocados en vitroresina en cada etapa para soportar los diferentes componentes: Capacitores, resistencias y espinterómetros.

### 3.3.1.3 Capacitores de cada etapa

Estos están hechos de papel impregnado en aceite ecológico y confinado en cajas metálicas con aislante pasante de porcelana.

Cada capacitor tiene las siguientes características técnicas:

- Tensión nominal en corriente continúa	100KV
- Capacitancia nominal	0.5 $\mu$ F
- Tolerancia sobre el valor nominal de la capacitancia	+ 10%. - 5%
- Inductancia propia	0.5 $\mu$ H
- Temperatura de funcionamiento	-10°C a + 40°C

### 3.3.1.4 Resistencias de forma de onda

El generador ha sido suministrado con un juego de resistencias de valores apropiados a fin de generar la onda de impulso 1.2/50 $\mu$ s, siendo clasificados según la función que cumplen dentro del circuito. Cada una de las resistencias están formadas por dos alambres esmaltados de Ni-Cr enrollados paralelamente y en sentido contrario sobre un tubo de resina de vidrio clase H. Cada resistor es capaz de soportar una tensión nominal de 100KV de cada etapa y son del tipo antinductivo. A continuación se presentan los valores y características técnicas de cada una de ellas:

#### a) Resistencias de frente

- valor nominal	12 $\Omega$
- Inductancia de la resistencia	1.5 $\mu$ H
- Capacidad térmica para un ritmo de 1 impulso cada 30 segundos.	2.5 KJ

#### b) Resistencias de cola

- valor nominal	120 $\Omega$
- Inductancia del resistor	2 $\mu$ H
- Capacidad térmica para un ritmo de 1 impulso cada 30 segundos	2.5 KJ

#### c) Resistencia de salida

La resistencia de salida está equipada con derivaciones para ajustar su valor de acuerdo al valor de la capacitancia a tierra del objeto de prueba, en el rango especificado para el generador se detallara mas adelante.

- Valor nominal (25+25+25) 75  $\Omega$
- Inductancia de la resistencia menor de 2  $\mu$ H
- Capacidad térmica para un ritmo 10 KJ  
de 1 impulso cada 30 segundos (Para 25  $\Omega$  5 KJ)

### 3.3.1.5 Resistencias de carga

Las resistencias de carga son los que transmiten la carga a los capacitores. Tienen las siguientes características:

- Valor nominal 3,500  $\Omega$
- Capacidad térmica para un ritmo 2.5 KJ  
de 1 impulso cada 30 segundos

### 3.3.1.6 Espinterómetros

Cada una de las cuatro etapas tiene su respectivo explosor de esferas (Espinterómetro). Cada espinterómetro esta formado por dos hemisferios de cobre de 125 mm de diámetro. Uno de los hemisferios de cada etapa puede moverse a lo largo de su eje horizontal en forma sincronizada con los respectivos hemisferios de las otras etapas, siendo estos accionados por un motor de doble sentido de giro, controlado desde la consola de mando.

El espinterometro de la primera etapa esta equipado en uno de sus hemisferios con un mecanismo de disparo (TRIGATRON), el cual permite obtener un control preciso sobre el disparo del generador.

Mediante un transductor acoplado al eje del motor se transmite hacia el banco de mando una lectura de espaciamento entre esferas.

### 3.3.1.7 Condensador trigatrón

Este condensador es el que transmite la señal de disparo del generador, la cual es generada por un dispositivo electrónico de precisión (ETR) ubicado en el banco de mando, hacia el espinterometro de la primera etapa del generador.

El condensador está formado con elementos capacitivos impregnados en aceite ecológico y en serie con otros

elementos encerrados en un recipiente aislante. Sus características técnicas se presentan a continuación:

- Tensión nominal de DC 100 KV
- Capacitancia nominal 750 pF
- Resistencia nominal 900  $\Omega$

### 3.3.2 Generador de corriente continúa

Este genera a partir de 220V de corriente alterna, los 100 KV de salida máxima a la que puede cargarse cada una de las etapas del generador de impulsos.

El generador DC está confinado en un recipiente cilíndrico aislante lleno de aceite mineral. A la salida y encima del recipiente están colocados los diodos cuya polaridad se monitorea desde el banco de mando.

El generador DC tiene las siguientes características técnicas:

- Tensión de alimentación a 50 Hz-60 Hz 220 V
- Tensión de salida en DC 100 KV
- Corriente nominal 20 mA

El generador lo conforman las siguientes partes:

#### a) Transformador elevador

Este eleva el voltaje de 220V a un nivel del orden de los KV. Sus características técnicas son:

- Potencia nominal 3 KV
- Tensión de entrada nominal AC 220 V
- Tensión de salida AC 44 KV

#### b) Capacitor de duplicación

Este tiene las características técnicas siguientes:

- Capacitancia nominal 5 nF
- Tensión nominal 50 KV

#### c) Diodos rectificadores

Estos tienen la función de rectificar la señal de AC que se presenta a la entrada del rectificador. Cada uno tiene las siguientes características técnicas:

- Tensión de inversa 150 KV
- Corriente nominal 225 mA

**d) Resistencias de protección de los diodos**

Estos limitan la corriente que llega a la sección de rectificación. Tienen las siguientes características:

- Tensión nominal 100 KV
- Resistencia nominal 15,000  $\Omega$

**e) Resistencia de medida**

Esta tiene un bajo coeficiente de temperatura y alta estabilidad ante variaciones de voltaje. Esta resistencia permite una medida directa del voltaje de carga por medio del miliamperímetro instalado en el banco de mando. Tiene las siguientes características técnicas:

- Tensión nominal en servicio continuo 100 KV
- Resistencia nominal 180 M $\Omega$
- Tolerancia sobre el valor nominal  $\pm 5\%$

**3.4 Capacitor de carga/divisor tipo ILCD**

Este tiene la doble función de capacitor de carga y divisor capacitivo. Este proporciona una muestra reducida de la forma onda de voltaje producida por el generador, preestablecida para los objetos sometidos a prueba, en el campo nominal de su capacidad.

Los elementos capacitivos que lo conforman están hechos de papel impregnado en aceite mineral y con armaduras salientes de modo que las conexiones entre los elementos sean cortas y robustas y se reduzca así el valor de la inductancia.

Toda la estructura del divisor está encerrada en una envoltura de polipropileno y dotada con un electrodo terminal.

El capacitor de carga consiste de:

- a) Una base de hierro equipada con ruedas para permitir su desplazamiento.
- b) Sección capacitiva, la cual tiene las siguientes características técnicas:
  - Capacitancia nominal 4000 pF
  - Voltaje nominal 400 KV
- c) Un electrodo hemisférico en la parte superior fabricado con una aleación de aluminio colado. Este sirve para

resistir los esfuerzos electrodinámicas que produce el alto voltaje en el divisor.

- d) Un adaptador a bajo voltaje para conectar un osciloscopio o un voltímetro de pico de impulso. Para esto dispone de un conector especial.

Los valores de capacitancia medidos son:

$$\begin{aligned}C_3 &= 977 \text{ nF} \\C_2 &= 4157 \text{ pF}\end{aligned}$$

La atenuación producida por el divisor capacitivo, viene dada por:

$$\begin{aligned}A &= \frac{C_2}{C_2 + C_3} \\A &= 4.24 \times 10^{-3}\end{aligned}$$

Por ejemplo para la carga nominal de 400KV se tiene que el voltaje atenuado es:

$$\text{Vatenuado} = 400\text{E}3 * 4.24\text{E}-3 = 1696 \text{ V}$$

Ver referencia [8]

El capacitor de carga/divisor se muestra en la figura 3.4.

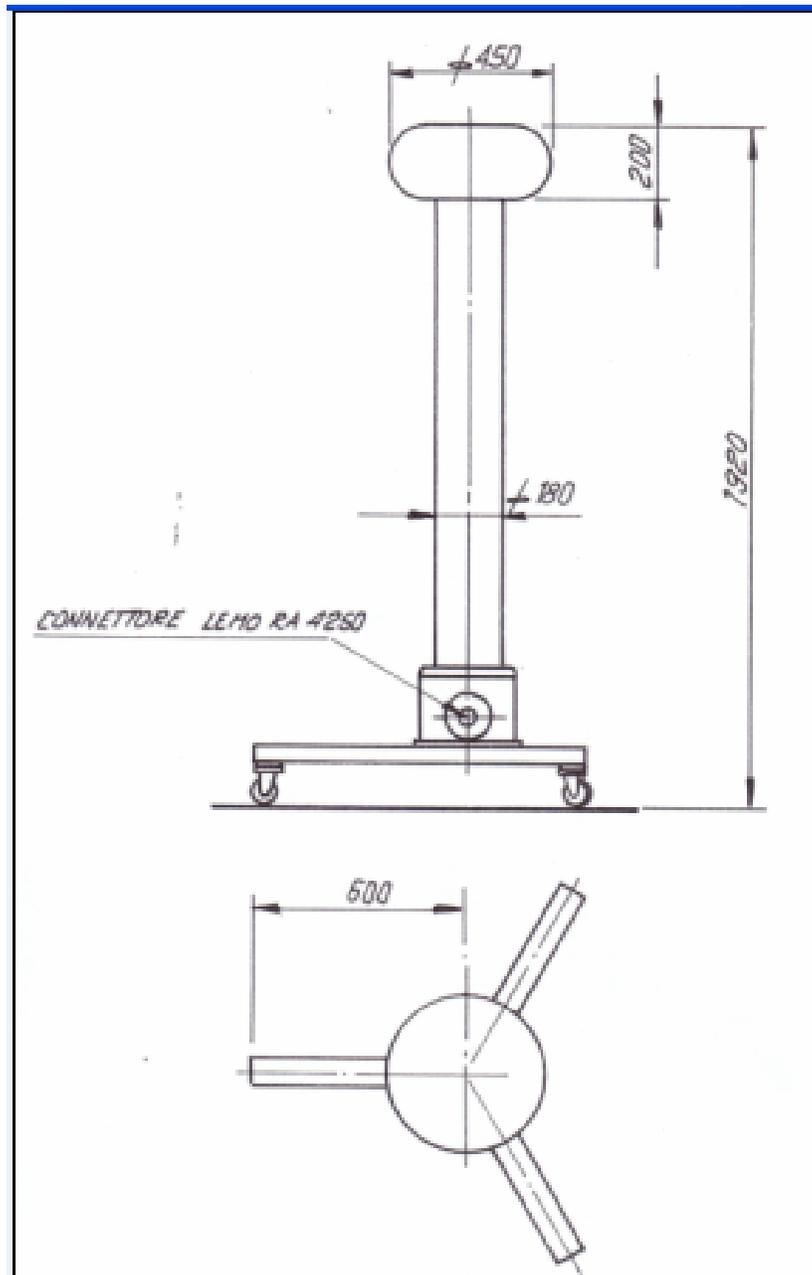


Figura 3.4. Capacitor de carga / Divisor

### 3.5 El espinterometro de medición

El espinterómetro de medición es del tipo MSG-25 y se utiliza como instrumento de ajuste y verificación del voltaje de cresta de la onda.

Tiene las siguientes características técnicas:

- Diámetro de las esferas 250 mm
- Máxima distancia entre las esferas 250 mm
- Tensión máxima permisible con impulsos atmosféricos:
  - Onda negativa 275 KV
  - Onda positiva 291 KV

El espinterómetro consiste de:

- a) Una base con perfiles soldados en hierro y aluminio, la cual está equipada con ruedas para permitir su desplazamiento.
- b) Una esfera superior de lámina de cobre.
- c) Un soporte para la esfera superior formado por un tubo de vitroresina y por un brazo metálico horizontal.
- d) Una esfera inferior de lámina de cobre, la cual puede moverse axialmente ya sea controlada desde el banco de mando, o bien moverse manualmente al accionar una palanca instalada en el soporte de esta esfera. Cuando se coloca la palanca para operación manual, se bloquea el control a distancia desde el banco de mando.
- e) Una varilla metálica graduada en mm integrada al soporte de la esfera inferior, la cual provee una lectura directa de la distancia entre las esferas.
- f) Un mando a distancia para mover axialmente la esfera inferior, el cual está formado por:
  - Un cilindro activado por un motoreductor.
  - Un equipo que evita que el árbol gire durante el desplazamiento axial de la esfera inferior.
  - Dos interruptores de final de carrera para frenar el movimiento vertical de la esfera.
  - Un potenciómetro que permite la lectura a distancia entre las esferas a través de un instrumento montado sobre el banco de mando.

El espinterómetro de medición se muestra en la figura 3.5

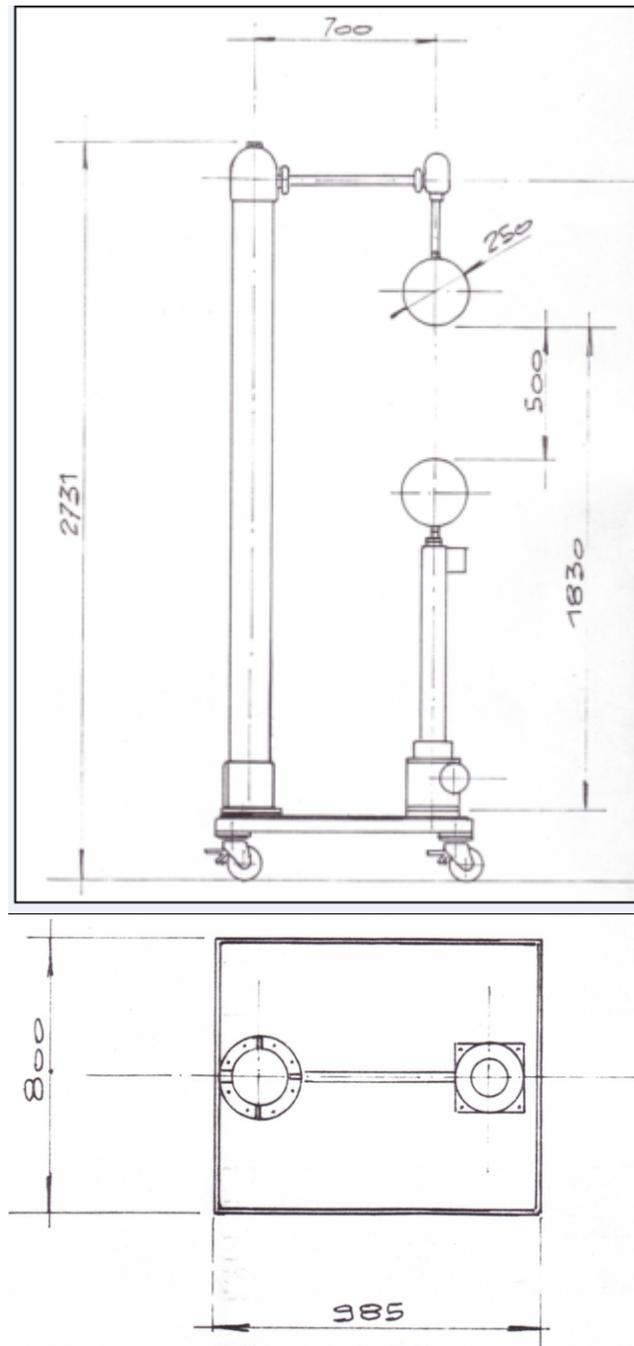


Figura 3.5. Espinterometro de medición



- F8: Fusible de 6A. Cuando está abierto la distancia entre los explosores de las etapas solo puede disminuirse no aumentarse.
- F9: Fusible de 2A. Cuando está abierto hace que el control de la distancia entre los explosores de las etapas, reduzca la distancia a la mínima posible, inhabilitando además el modo de ajuste automático. La distancia, sin embargo es posible ajustarla manualmente.
- F10: Fusible de 2A. Cuando está abierto tiene el mismo efecto que el fusible F9
- F11: Fusible de 4A. Cuando está abierto desactiva el control del espinterometro de medición.
- F12: Fusible de 4A. Cuando está abierto tiene el mismo efecto que el fusible F11.

La unidad de potencia recibe la alimentación para las diferentes unidades del banco de mando, así como también para el generador de impulsos.

### 3.6.2 Unidad de servicios

Está ubicada en la parte inferior del panel frontal del banco de mando (ver figura 3.6), y en ella se encuentran instalados los siguientes controles:

#### 3.6.2.1 Interruptor de control (control switch)

Este es un interruptor de llave que controla la alimentación de los servicios auxiliares. Si la llave no se ha insertado y girado en sentido horario, el banco de mando no funciona.

#### 3.6.2.2 Interruptor de aterrizaje (earthing switch)

Este tiene la función de activar y desactivar el dispositivo de puesta a tierra del generador de impulsos. Consta de dos pulsadores los cuales se iluminan al presionarlos, indicando así que han sido activados.

**Luz Roja :** Indica que el generador no está puesto a tierra.  
**Luz Verde:** Indica que el generador está puesto a tierra.

Para cambiar de un estado a otro se oprime el pulsador que no está iluminado, el cual después de esta acción se

iluminará para indicar el cambio de estado del sistema de puesta a tierra.

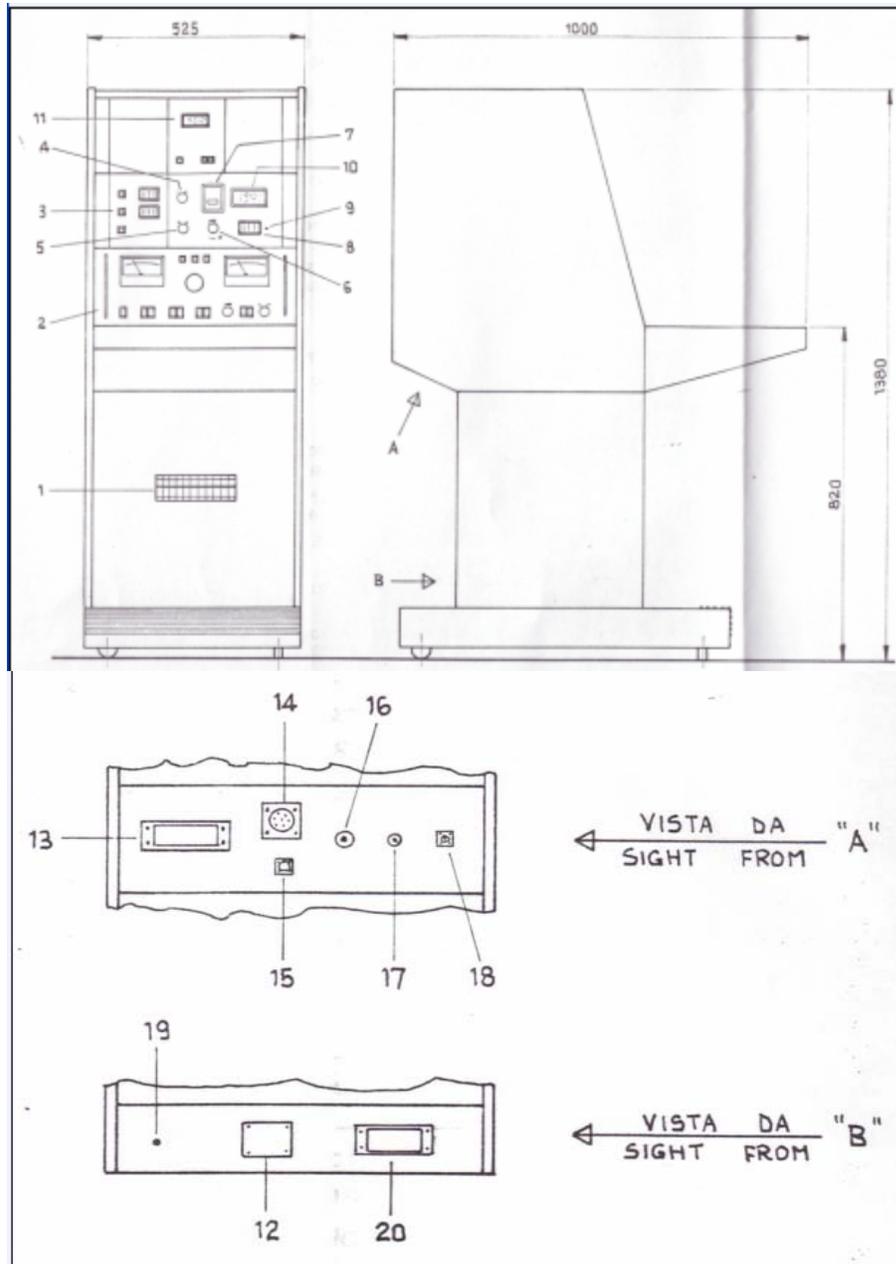


Figura 3.6. Banco de mando

Donde:

- 1 Circuit breaker generales y fusibles
- 2 Unidad de servicio de control

- 3 Unidad de disparo de dos canales
- 4 Selector shot nr.
- 5 Selector de rango de voltaje
- 6 Regulador del intervalo de tiempo
- 7 Contador de impulsos
- 8 Regulación del voltaje de carga
- 9 Listo
- 10 Medida del voltaje de carga
- 11 Unidad de control de la distancia del explosor de medición
- 12 Conector de alimentación [alimentación principal] [220 V]
- 13 Conector de servicio [aux.output] [nr.1]
- 14 Conector del control de la distancia de las esferas
- 15 Conector de seguridad externa
- 17 Conector de disparo del osciloscopio [disparo del generador]
- 18 Conector del divisor
- 19 Terminal de tierra
- 20 Conector de servicio [aux.output] [nr.2]

Figura 3.6. Continuación

### 3.6.2.3 Interruptor de carga (charging switch)

Este interruptor activa el contactor de carga, con lo que se activa el generador DC el cual produce el voltaje necesario para cargar las etapas del generador. Los pulsadores se iluminan al presionarlos, indicando así que han sido activados.

**Luz Roja :** Indica que el interruptor de carga esta cerrado.

**Luz Verde:** Indica que el interruptor de carga esta abierto.

Para cambiar de un estado a otro se oprime sobre el pulsador que esta apagado, el cual después de esto se iluminará para indicar el cambio de estado que se ha producido.

### 3.6.2.4 Polaridad (polarity)

Este es un doble indicador luminoso en color azul, el cual indica la polaridad del voltaje de carga:

+ : polaridad positiva

- : polaridad negativa

El cambio de polaridad se realiza manualmente al accionar una manivela instalada en el generador. Esto se explicara posteriormente.

#### **3.6.2.5 Apagado de emergencia (emergency off)**

Este es un pulsador en forma de hongo el cual detiene todas las operaciones y pone a tierra toda la instalación.

- Para activarlo solamente se presiona. En este momento se activará la alarma la cual puede pararse al presionar ALARM STOP.
- Para desactivarlo se gira en sentido horaria, tal como lo indican las flechas impresas sobre él.

#### **3.6.2.6 Alarma (alarm)**

Pulsador rojo que al oprimirlo se iluminará y activará la sirena. Esto puede servir par indicar que van a iniciarse las pruebas.

#### **3.6.2.7 Parada de la alarma (alarm stop)**

Pulsador rojo que al oprimirlo se ilumina y desactiva la al arma.

#### **3.6.2.8 Falta de aire (no air)**

Indicador luminoso de color amarillo que indica que la presión de aire se encuentra por debajo de la presión mínima requerida.

#### **3.6.2.9 Corriente de alimentación (feeding current)**

Amperímetro clase 1.5, el cual mide la corriente de carga.

También dentro de la sección de servicios se encuentran los controles para ajustar la distancia entre los explosores de las etapas del generador.

### **3.6.2.10 Distancia entre esferas (sphere gap distance)**

Indica la distancia en mm existente entre los dos hemisferios del espinterómetro de la primera etapa del generador.

### **3.6.2.11 Ajuste de la regulación (reg. adj.)**

Este es un potenciómetro de ajuste, el cual permite regular en  $\pm 7\%$ , la calibración interna KV-mm para el modo de funcionamiento automático. Este control solo tiene efecto cuando se están utilizando voltajes de carga superiores a 10 KV.

### **3.6.2.12 Conmutador auto/man**

Este permite la opción de ajustar manualmente la distancia entre los explosores, o bien dejar que la distancia se ajuste automáticamente según el voltaje de carga que se utilice.

### **3.6.2.13 Control manual (man. control)**

Doble pulsador el cual permite aumentar o disminuir en forma manual la distancia entre los explosores de las etapas.

- El de la izquierda, aumenta la distancia (→)
- El de la derecha, disminuye la distancia (←)

## **3.6.3 Unidad de regulación**

La unidad de regulación tiene la función de controlar la carga y descarga del generador de impulsos. Esta unidad se encuentra ubicada hacia la derecha y por encima de la unidad de servicios. Consta de los siguientes controles:

#### **3.6.3.1 Rango de voltaje (voltage range low/high)**

Este conmutador permite seleccionar el rango de voltaje de carga a generar, según el voltaje de salida demandado del generador.

En la posición LOW se puede generar hasta 50 Kv de carga (por etapa),

En la posición HIGH se puede generar arriba de 50 Kv, hasta un máximo de 99.9Kv (por etapa).

#### **3.6.3.2 Intervalo de tiempo (time interval)**

Este permite la regulación de la pausa que debe hacerse entre impulsos consecutivos, lo cual dependerá, del voltaje de carga del generador como se verá posteriormente. Girando en sentido horario aumenta el tiempo de espera, en sentido contrario disminuye. Una luz amarilla encendida indicará que debe esperarse para reiniciar la carga.

#### **3.6.3.3 Ajuste del voltaje de carga (voltage setting)**

Este consiste de un potenciómetro digital con el cual se puede seleccionar un voltaje de carga entre 10 y 99.9 KV. (El punto no aparece en el potenciómetro, por lo que se verá 999).

#### **3.6.3.4 Listo (ready)**

Esta es una indicación luminosa de color rojo la cual señala cuando el generador ha alcanzado la tensión de carga preestablecida.

#### **3.6.3.5 Voltaje de carga (charging voltage)**

Este es un kilovoltímetro digital el cual mide la tensión de carga del generador.

### 3.6.3.6 Número de disparos ( shot nr)

Este es el control mediante el cual se fija el número de impulsos consecutivos a producir en el modo de funcionamiento automático y con el conmutador SIGN./MUL, en la posición MUL. Para fijar el número de impulsos a producir debe presionarse simultáneamente el botón independiente y el botón que corresponde al dígito que se desea cambiar.

### 3.6.3.7 Conmutador sing./ mul

Este conmutador se utiliza para el funcionamiento en ciclo automático y permite seleccionar si se hará una generación de impulsos sencilla ó múltiple.

### 3.6.4.0. Unidad de disparo " trigger" (ETR)

Esta tiene la función de:

- Activar el dispositivo de disparo final (FTR) ubicado en la plataforma del generador.
- Generar una señal de disparo para el osciloscopio
- Generar una señal de disparo para el generador.
- También se utiliza para generar la señal de disparo del dispositivo de recorte.

Esta se localiza hacia la izquierda y por encima de la unidad de servicio en el panel frontal. Consta de los siguientes controles:

#### 3.6.4.1 Principal (main)

Pulsador de color rojo el cual queda iluminado y sostenido al oprimirse. Permite la alimentación de esta unidad.

#### 3.6.4.2 Disparo manual (manual firing)

Este es un pulsador de contacto momentáneo el cual sirve para activar el disparo del osciloscopio. Cuando se opera en modo múltiple se oprime solo una vez, después la generación de impulsos es automática.

#### **3.6.4.3 Retardo del inicio (release delar)**

Este es un potenciómetro digital por medio del cual se ajusta el retardo de tiempo que existirá entre el disparo del osciloscopio y el disparo del generador.

#### **3.6.4.4 Control de recorte ( chopping control)**

Este es un pulsador luminoso, con el cual se activa el disparo para el dispositivo de recorte.

#### **3.6.4.5 Retardo del recorte (chopping delay)**

Potenciómetro digital por medio del cual se fija el retardo de tiempo que deberá existir entre el disparo del osciloscopio y el disparo del generador.

### **3.6.5 Unidad de control del espinterómetro de medición**

Esta unidad está ubicada en la parte superior del panel frontal. Tiene dos funciones:

- Medir la distancia entre las esferas
- Ajustar la distancia entre las esferas al controlar el movimiento de la esfera inferior

Consta de los siguientes controles:

#### **3.6.5.1 Principal (main)**

Pulsador luminoso que permite la alimentación a esta unidad.

#### **3.6.5.2 Control de distancias entre esferas**

Este consta de dos pulsadores:

- Pulsador para aumentar la distancia entre esferas
- Pulsador para reducir la distancia entre esferas

### **3.6.5.3 Indicador de la distancia entre esferas**

Indica la distancia en milímetros existente entre las esferas.

Para impedir el movimiento de las esferas durante el impulso, esta unidad queda desactivada al estar activa la UNIDAD DE DISPARO "TRIGGER".

### **3.6.6 Parte posterior**

En la parte trasera de la consola de mando se encuentran los diferentes conectores, para acoplar los cables que transmiten las señales de medición y control desde la consola hacia el generador, equipo auxiliar y viceversa. Una vista de la parte posterior se ve como en la figura 3.6.

#### **3.6.6.1 Conector de puesta a tierra**

A través de un cable de cobre este debe conectarse a tierra a efecto de descargar cualquier voltaje que pudiera inducirse en la estructura metálica de consola.

#### **3.6.6.2 Conector de alimentación**

Aquí se conecta el cable que suministra la alimentación a 220V a la consola de control.

#### **3.6.6.3 Measuring spheregap connector (conector del explosor De medición, AUX INPUT NR2)**

Conector multipolar para el espinterómetro ó explosor de medición. Aquí se conecta un cable el cual transmite señales de medición y control hacia y desde el espinterómetro.

#### **3.6.6.4 Servicie (AUX-INPUT NR1)**

Conector multipolar para servicios auxiliares al generador de impulsos.

#### **3.6.6.5 Transducer**

Este conector aloja al cable el cual transmite señales de medición y control de la distancia entre los hemisferios de los explosores de cada una de las etapas del generador.

#### **3.6.6.6 Gen. firing (tríгатron connector)**

Este aloja al cable que transmite el impulso hacia el dispositivo trígatron, el cual dispara el generador.

#### **3.6.6.7 Means input**

En el se conecta el cable acoplado a la resistencia de medición en el generador, la cual da una medida del voltaje de carga del mismo.

#### **3.6.6.8 CR01**

En el se conecta el cable que transmite la señal de disparo al osciloscopio.

#### **3.6.6.9 Safety.**

Circuito de seguridad.

### **3.6.7 Instrucciones de mantenimiento**

#### **3.6.7.1 Mantenimiento de rutina**

Remover periódicamente el polvo u otras sustancias que puedan provocar suciedad en las piezas aislantes y reducción en el límite de su capacidad superficial. Para las partes de polipropileno se recomienda utilizar trapo antiestático.

### **3.6.7.2 Mantenimiento extraordinario**

Si la instalación presenta un aumento irregular de descargas "intempestivas" en la etapa de carga, se puede atribuir a que está comenzando un proceso de corrosión con formación de superficies rugosas en los casquetes de Tungsteno.

Si la descarga intempestiva se presenta siempre en el mismo espinterómetro, puede ser suficiente con desarmar solo el espinterómetro y verificar la superficie y la distancia de alineamiento.

Cada 4 meses se debe controlar el interior del banco de mando para evitar la acumulación de polvo o sustancias contaminantes dañinas para los circuitos electrónicos.

Cada 4 meses se debe controlar que no existan huellas de oxidación en las tarjetas electrónicas. Si así fuera, se deben limpiar con desoxidante o alcohol.

### **3.7 Osciloscopio**

El osciloscopio disponible es un osciloscopio de almacenamiento digital, marca FLUKE, modelo ScopeMeter Color 196C, el cual es un instrumento de medición portátil, de dos canales o entradas aisladas (A y B) verticales y que tiene la capacidad de medir señales a una frecuencia máxima de 100 MHz. Este ancho de banda resulta muy adecuado para su aplicación en el laboratorio de la prueba impulso, no así su voltaje máximo de entrada, el cual es de solamente 600V pico, ya que en esta aplicación se obtienen voltajes de entrada provenientes del divisor mayores que el especificado para este osciloscopio. Para mayor información ver anexo A.

### **3.8 El objeto bajo prueba**

La variedad de objetos que pueden someterse a prueba está determinada por el valor de voltaje de salida requerido por estos y por el valor de la capacitancia a tierra de los objetos en relación a la capacitancia de carga máxima que el generador puede manejar. En este caso este valor es de 8500 pF para la conexión que permite un voltaje de salida máximo de 100 KV.

De acuerdo a las características del generador de impulsos, el cual puede dar una salida de voltaje de 400 KV máxima, podrían someterse a la prueba de impulso de rayo:

- Transformadores de distribución y sus aisladores asociados los cuales tengan una clase de aislamiento comprendida entre 1.2 KV y 69 KV, cuyos valores de BIL son 30 KV y 350 KV, respectivamente. La clase de aislamiento y el BIL para transformadores de distribución se encuentran tabulados en el capítulo IV.
- Aisladores de suspensión y aisladores de espiga, utilizando el generador para determinar la tensión crítica de flameo conociendo de antemano el valor del BIL correspondiente al voltaje de transmisión o distribución. La tensión crítica de flameo está íntimamente relacionada con EL DIMENSIONAMIENTO DIELECTRICO EN LINEAS DE TRANSMISIÓN.
- Cables de potencia especificados para un voltaje de operación de hasta 30 KV, para el cual el voltaje de impulso es de 400 KV.
- Seccionadores de cuchilla cuyo BIL sea de 400 KV o inferior.

### **3.9 El compresor**

El compresor suministra la presión de aire necesaria para el funcionamiento del sistema neumático de puesta a tierra. Este puede ser cualquier compresor que cumpla con las condiciones de poder suministrar una presión comprendida entre 4.5 y 6 bars, (Una capacidad mayor no es una limitante), y que tenga una válvula capaz de alojar el ducto que transmite la presión de aire hacia el sistema neumático.

### **3.10 Rehabilitación del equipo generador de alto voltaje**

#### **3.10.1 Limpieza de la infraestructura del edificio de potencia.**

Se realizo la limpieza de pisos y paredes del laboratorio de potencia, la reconstrucción del cielo falso y modificación del sistema de iluminación del área donde esta instalado el equipo con los pocos recursos que contábamos.

### 3.10.2 Limpieza general externa

Se realizó la limpieza externa de cada uno de los módulos que forman el equipo de alto voltaje lo cual consistió en remover la suciedad pegada, aceite, grasa, polvo, excrementos y orines de ratas tal como se muestra en las figuras siguientes.



Figura 3.7. Limpieza del espinterometro de medición.



Figura 3.8. Limpieza del modulo de generación.



Figura 3.9. Limpieza del modulo de capacitor de carga - divisor.

### 3.10.3 Limpieza interna de cada uno de los módulos

Se realizó la limpieza interna de cada uno de los módulos como lo muestran las siguientes figuras:



Figura 3.10. Limpieza del panel de control



Figura 3.11. Limpieza de cada uno de los módulos que forman panel de control



Figura 3.12. Limpieza de unidad de servicio del panel de control.



Figura 3.13. Limpieza de unidad de control del espinterometro de medición.

3.10.4 Revisión y prueba de las uniones, conexiones, terminales, conductores y cables, de los módulos, los cuales se muestran en las siguientes figuras.



Figura 3.14. Revisión de las conexiones de los conductores del panel de control.

En la figura 3.14, se puede observar que se encontraron varios conductores cortados, mordidos por las ratas, con soldaduras cortadas, para poder soldarlos en la posición que les correspondía se contó con los diagramas esquemáticos del equipo.



Figura 3.15. Revisión y prueba de cada uno de los fusibles que tiene el modulo de control.



Figura 3.16. Revisión y prueba de los conectores y contactos de los conductores del motor del espinterometro de medición.



Figura 3.17. Revisión, prueba de los conectores, contactos, terminales de los conductores y calibración de los interruptores de final de carrera del espinterometro de medición.



Figura 3.18. Revisión, prueba y medición del circuito electrónico de disparo del generador de impulsos.



Figura 3.19 Revisión y medición de los elementos resistivos, resistencia de frente, resistencia de cola y resistencia de carga, del generador de impulsos.



Figura 3.20. Una pequeña revisión y medición de los elementos que contiene la tarjeta, de la unidad de regulación en el panel de control. Se observo que a la tarjeta se le habían realizado modificaciones de elementos electrónicos.

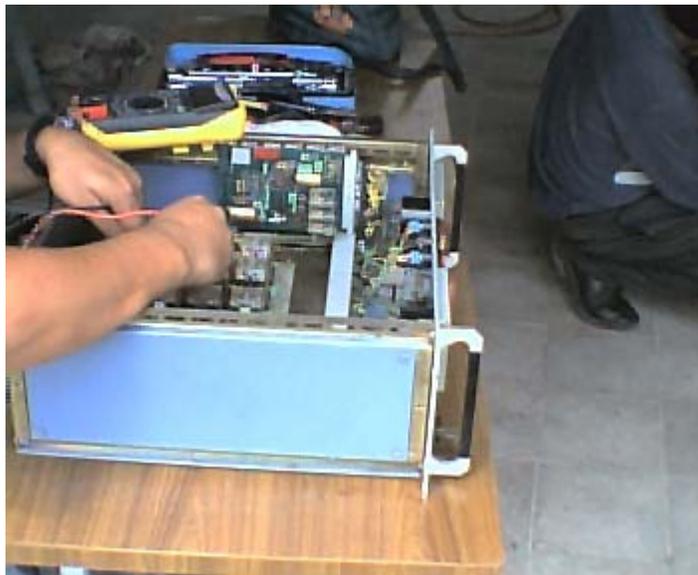


Figura 3.21. Una pequeña revisión y medición de los elementos de la tarjeta que contiene los relees, de la unidad de servicios en el panel de control.



Figura 3.22. Una pequeña revisión y medición de los elementos que contiene la tarjeta, de la unidad de servicios en el panel de control. Se observo que a la tarjeta tenia una pista quemada debido a un corto circuito.



Figura 3.23. Una pequeña revisión y medición de los elementos que contiene la tarjeta, de la unidad de control del espinterometro de medición. Se observo que a la tarjeta se encontraba en buenas condiciones.

### 3.11 Prueba preliminar del funcionamiento del equipo.

Con todos los procedimientos desarrollados en las secciones anterior a simple vista se podría decir que el equipo se encontraba en buen estado, para poder estar seguro de su buen funcionamiento se procedió a realizar una prueba preliminar, para lo cual se coloco la llave en el switch de encendido y se giro a la posición ON se pudo observar que el equipo encendió, no dio fallas de corto circuito en sus tarjetas electrónicas y se encontraba puesto a tierra pero cuando se pulso el push botón para deshabilitar la puesta a tierra se encontró el primer problema, que la parte neumática que realiza esta función no estaba funcionando bien, debido a que cuando se pulsaba el push botón el vástago del cilindro neumático no bajaba, por lo que se procedió a revisar esta pieza y a simple vista no se observo que estuviera dañada, por lo que se procedió a desmontarla del equipo para una mejor revisión, la pieza se muestra en la siguiente figura.



Figura 3.24. Pieza del sistema neumático de puesta a tierra.

Como se puede observar la pieza se encuentra dañada para observar mejor lo dañado de la pieza se muestra la siguiente figura.



Figura 3.25. Una mejor vista del daño a la pieza del sistema neumático de puesta a tierra.

Como se puede ver en esta figura el daño de la pieza es la muesca la cual no permitía que el embolo que sostiene el vástago no bajara hasta su posición mínima, por lo cual no permitía que el sensor de posición mas baja se activara en el panel de control por lo tanto no permitía que diera paso para poder cargar el equipo.

### **3.11.1 Solución al daño de la pieza del sistema neumático de puesta a tierra.**

Este fue el primer problema delicado que se nos presento en el transcurso de la rehabilitación de este equipo debido a que es único en el país y no se cuenta con un lote de repuestos disponibles.

Se realizaron varias consultas de cómo se podría rectificar u obtener la pieza y lo que nos recomendaron fue que mandáramos a construir la pieza nueva, se realizaron varias cotizaciones en talleres y en empresas de construcción de piezas hidráulicas y lo que nos decían es que no se podía rectificar por ser una pieza desechable y lo que se podía hacer es construirla nueva pero que ellos no podían realizarla porque era una pieza delicada y difícil de construir.

Pero al final de tanto andar cotizando la empresa Central Hidráulica nos prometió construirla pero que se tardarían unos días y a un costo elevado ya que la contracción era difícil y delicada, cuando nos la entregaron se instalo en el equipo y se probó nos dio problemas por que fallo se soltó el vástago del embolo y quedo flojo ya no realizaba la

puesta a tierra por lo que se procedió a desmontarla del equipo y llevarlo para que repararan esta falla.

La pieza construida se presenta en la siguiente figura.



Figura 3.26. Pieza construida del sistema neumático de puesta a tierra.

El día que nos devolvieron la pieza ya reparada se instalo en el equipo y se le realizaron pruebas y esta ya no fallo ya se podía realizar la puesta a tierra del sistema, pero se presento el segundo problema cuando se deshabilita la puesta a tierra esta pieza tiene que mandar una señal al panel de control para poder iniciar el proceso de voltaje de carga lo cual no se logro, como se puede observar en la siguiente figura esta pieza posee dos sensores magnéticos.



Figura 3.27. Pieza construida del sistema neumático de puesta a tierra con los sensores magnéticos.

Estos sensores magnéticos externos son habilitados por un imán que se encuentra instalado internamente en el embolo de la pieza neumática, cuando el vástago se encuentra en la posición superior se habilita el sensor superior enviando una señal al panel de control para encender un piloto que indica que el sistema esta aterrizado a tierra, este piloto no se encendía por lo cual no se habilitaba el sensor superior.

Cuando el vástago se encuentra en la posición inferior se habilita el sensor inferior enviando una señal al panel de control para encender un piloto que indica que el sistema esta listo para iniciar periodo de carga, este piloto no se encendía por lo cual no se habilitaba el sensor inferior.

Se creía que los sensores estaban dañados para asegurarnos se realizo una prueba con un imán externo introducido en un pedazo de tubo de aluminio de espesor parecido al del tubo de la pieza original y se observo que los pilotos del panel

de control si se encendían por lo tanto los sensores estaban en buen estado, y se concluyo que la pieza del tubo de aluminio con que fue construida era de mayor espesor que el de la pieza orinal, por lo que se llevó para que la repararan de nuevo.

Después de se nos entrego la pieza ya rectificada con el espesor requerido se instalo en el equipo, se realizaron pruebas y si se activaron los sensores y por lo tanto los pilotos del panel de control.

### 3.12 Revisión y reparación de las tarjetas electrónicas del panel de control.

Con todo el mecanismo de la sección anterior reparado al accionarse el sensor inferior se da paso a que se inicie el proceso de carga de voltaje pero al presionar el push botón de inicio de carga se observo que daba indicios de querer cargar pero no se logro dicho propósito por lo que se procedió a revisar y probar elemento por elemento cada una de las tarjetas de instrumentación electrónica.

#### 3.12.1 Tarjeta electrónica de la unidad de servicio

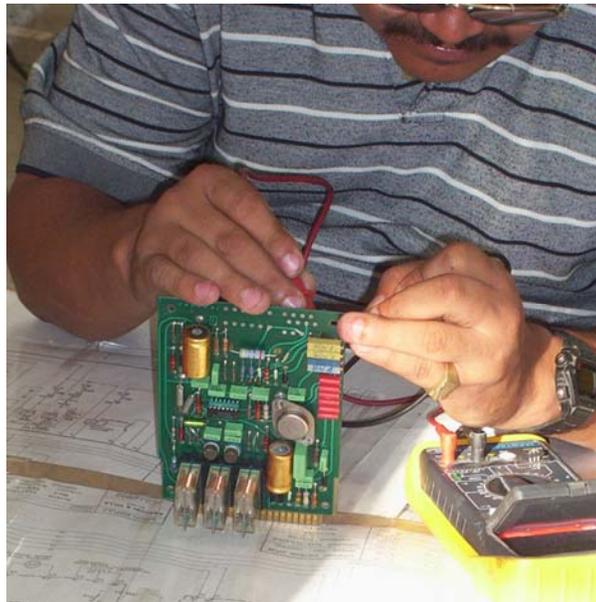


Figura 3.28. Tarjeta electrónica de la unidad de servicio.

Se procedió a revisar y probar todos y cada uno de los elemento de esta tarjeta la cual tenia una pista quemada debido a un corto circuito en dicho proceso se encontraron varios elementos dañados los cuales se sustituyeron por nuevos entre los cuales se pueden mencionar los cuatro potenciómetros de precisiacion que sirven para poder hacer la regulaci3n de la distancia de las esferas o explosores de cada una de las etapas del generador, un rectificador de voltaje, un diodo zener que funciona como fuente de 15 voltios fijos, un integrado LM 324, una resistencia de 470 ohmios por 5 watts y unos capacitores.

Despu3s de haber sustituidos todos estos elementos por nuevos se simularon los potenci3metros y switch para probar el funcionamiento de esta tarjeta como lo indica el diagrama esquemática de esta tarjeta y se comprob3 que funciono muy bien.

### 3.12.2 Tarjeta electr3nica de la unidad de regulaci3n

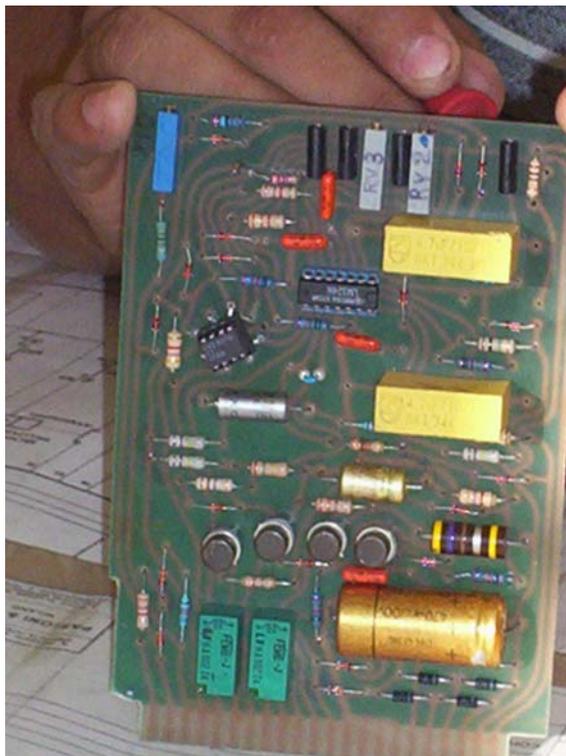


Figura 3.29. Tarjeta electr3nica de la unidad de regulaci3n

Se procedió a revisar y probar todos y cada uno de los elemento de esta tarjeta se observo que se le habían realizado modificaciones pero dichos elementos no tenían nomenclatura de numeración por lo que se utilizo el diagrama de esta tarjeta para realizar la revisión en dicho proceso se encontraron varios elementos dañados los cuales se sustituyeron por nuevos entre los cuales se pueden mencionar un diodo normal, un integrado LM 324, un diodo zener que funciona como fuente de 15 voltios fijos.

También se realizo la modificación según el diagrama de una fuente fija utilizando un integrado REF 01 el cual fija 10 voltios.

Después de haber sustituidos todos estos elementos por nuevos se simularon potenciómetros y switch para probar el funcionamiento de esta tarjeta como lo indica el diagrama esquemático de esta tarjeta y se comprobó que funciono.

Se instalaron estas tarjetas ya reparadas en el control de mando y se procedió a realizar pruebas para observar si el equipo se cargaba después de varias pruebas se observo que el equipo no logro cargar por lo que se pensó que los capacitores estaban dañados para comprobar esto se le realizo la prueba a cada uno de los cuatro capacitores como se muestra en la siguiente figura.



Figura 3.30. Prueba de los capacitores.

Para lo cual se utilizo el medidor de aislamiento electrónico el cual le proporciona 800 voltios de carga.



Figura 3.31. Descarga de los capacitores.

Para lo cual se utilizo un voltímetro o tester.

Con estas pruebas realizadas se concluyo que los capacitores se encuentran en buen estado por lo que se seguía teniendo el problema que el equipo no cargaba.

Se realizo la prueba para verificar si el transformador elevador generaba voltaje acercando el tester digital y se obtuvo un voltaje inducido de 280 voltios, y además se erizaron los bellos de los brazos, por lo tanto si esta generando voltaje, por lo que se decidió revisar el modulo de rectificación.



Figura 3.32. Prueba del transformador elevador de voltaje.

### 3.13 Prueba y revisión del modulo de rectificación

Para poder desarrollar esta prueba se desmonto el modulo de rectificación del generador de impulsos y se desarmo pieza por pieza como se muestra en la siguiente figura.



Figura 3.33. Piezas del modulo de rectificación.

Al desarmar este modulo se observo que existen tres causas por las cuales este modulo no realiza el proceso de rectificación las cuales se explican a continuación.

1. Las cuatro ruedas que contienen la serie de diodos rectificadores para generar tanto la polaridad positiva como negativa no se encuentran bien alineadas con los puntos de contacto por lo cual no se realizaba el proceso de rectificación esto se ilustra en la figura 3.34.

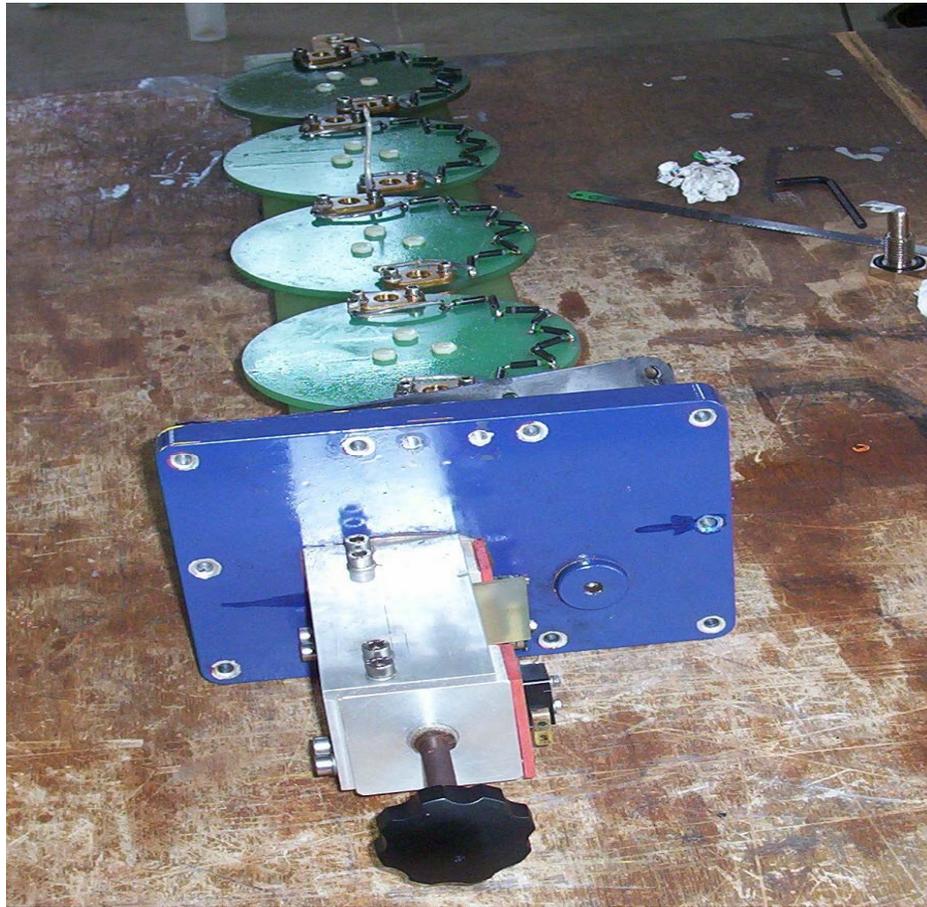


Figura 3.34. Ruedas con los diodos rectificadores no alineadas

2. Algunos puntos de las cuatro ruedas que contienen los diodos rectificadores no realizan conexión con los contacto en la base la cual se realiza a través de un balero a presión por un resorte por lo tanto no se realizaba el proceso de rectificación esto se ilustra en la figura 3.35.



Figura 3.35. Puntos de conexión de las ruedas que no hacen contacto

3. El aceite aislante en el cual se encuentra sumergido todo este mecanismo donde están montados los diodos rectificadores se encuentra dañado por lo tanto pierde todas las características de aislamiento, este presenta un color negro quemado esto se ilustra en la figura 3.36.



Figura 3.36. Aceite aislante dañado

En la figura 3.37 se puede observar como se encontró uno de los puntos de contacto con las ruedas donde se encuentran montados los diodos rectificadores este contacto se observa quemado el otro ya fue limpiado previamente, también se realizó un filtrado del aceite y al final en el filtro quedaron partículas cristalizadas de carbón.



Figura 3.37. Puntos de contacto quemados

Después de haber observado estas tres causas se procedió a corregirlas para lo cual se desmontaron las cuatro ruedas y se alinearon con el eje dentado que las hace girar, también se corrigió las partes donde los valeros no realizaban buena conexión y contacto colocándole cuñas de aluminio, también se le aplicó bajo voltaje para probar si los diodos no estaban dañados, se probó que funcionaban bien esto se ilustra en la siguiente figura.



Figura 3.38. Proceso de corrección de las ruedas

Se cambio el aceite dañado por aceite nuevo para lo cual se utilizo UNIVOLT 61 que es tipo II, para realizar este cambio se procedió a lavar todo el mecanismo y recipiente donde se introduce con aceite nuevo para limpiar las impurezas del aceite viejo para mayor seguridad, aislamiento y que no se contaminara el nuevo.

#### DESCRIPCIÓN:

UNIVOLT es una línea de aceites aislantes minerales de alta calidad y alta resistencia a la oxidación, que ha sido utilizado exitosamente por años en todos los servicios de equipo eléctrico.

UNIVOLT 61 es del tipo inhibido, de tal forma que tiene una superior estabilidad a la oxidación natural del aceite.

#### APLICACIONES:

- Transformadores de alto voltaje.
- Transformadores de distribución y subestaciones.
- Switchs.
- Capacitores.

VENTAJAS Y BENEFICIOS:

- UNIVOLT tiene excelente estabilidad a la oxidación y mínima formación de depósitos.
- Aceite con alto grado de refinación, lo que permite brindar periodos extendidos de uso.
- Extraordinaria capacidad dieléctrica y eficaz transferencia de calor.
- Disponible en dos tipos diferentes que satisfacen y exceden las especificaciones ANSI/ASTM D-3487 tipo I y tipo II.
- Baja viscosidad combinada con alto punto de inflamación y muy bajo punto de congelación.
- Excelente compatibilidad con los materiales usados en la construcción de los equipos eléctricos.

Tabla 3.1 CARACTERISTICAS TIPICAS DEL ACEITE UNIVOL 61

PROPIEDAD	METODO ASTM	ANSI/ASTM D3487		UNIVOLT	
		TIPO I	TIPO II	60	N61
Viscosidad a 40 <sup>o</sup> C, cSt	D661	12.0 Max		8.9	
Viscosidad a 100 <sup>o</sup> C, cSt	D445	3.0 Max		2.3	
Gravedad Especifica a 15 <sup>o</sup> C, g/l	D1298	0.91 Max		0.874	
Punto de Inflamación <sup>o</sup> C	D92	145 Min		149	
Punto de Congelación <sup>o</sup> C	D97	- 40 Max		- 45	
Calor	D1500	0.5 Max		L0.5	
Tensión Superficial a 25 <sup>o</sup> C, dn/cm	D971	40 Min		46	
Numero de Neutralización ,mgKOH/g	D974	0.03		0.01	
Policloruros de Bifenilo (PCBs)	D4059	-----		No detectado	
Rigidez Dieléctrica, a 60 Hertz E.dis.. KV	D877	30 Min		40	
Factor de Potencia, 60 Hertz a 25 <sup>o</sup> C	D924	0.05 Max		0.003	
Factor de Potencia, 60 Hertz a 100 <sup>o</sup> C	D924	0.30 Max		0.087	

Después de haber reparado el modulo de rectificación se instalo de nuevo el generador de impulsos, se dejo un día para que el aceite reposara y luego se procedió a realizar pruebas para probar si el generador cargaba y a su vez si el modulo de rectificación estaba funcionando al realizar las pruebas se observo que si estaba cargando y por lo tanto rectificando pero no al voltaje de carga fijado por ejemplo

se fijo para un voltaje de carga de 10 KV y el generador cargo a 3.5 KV, luego se fijo para 30 KV y el generador cargo a 7.8 KV, luego no importaba que voltaje se fijara el siempre cargaba a 7.8 KV por lo que se concluyo que no esta cargando como debería ser, esto fue otro de los problemas que se nos presentaron por lo tanto se decidió revisar todo el cableado del modulo de control valiendonos de los diagramas revisando paso a paso cada uno de los cables se observaron que le habían hecho varias modificaciones que al compararlas con los diagramas no concordaban con los puntos y polaridades requeridos en los diagramas se rectificaron todas estas modificaciones pero al revisar los conectores de las tarjetas de la unidad de regulación y la unidad de servicio se observo que tres conexiones no coincidían con las conexiones en los diagramas se modificaron estas conexiones entre las dos tarjetas que tenían que ver con la carga del generador después de realizar todas estas modificaciones se desarrollo la primera prueba llegando a algo satisfactorio el generador cargo y se disparo automáticamente.

Se presento otro problema que la distancia de los explosores de las etapas no se podía regular y por lo tanto no se podía calibrar al revisar esta etapa se observo que los dos microswitch que realizan esta función se encontraban dañados se repararon y se instalaron luego se realizo el proceso de calibración de la distancia de los explosores tanto para la forma manual como automática de una forma satisfactoria.

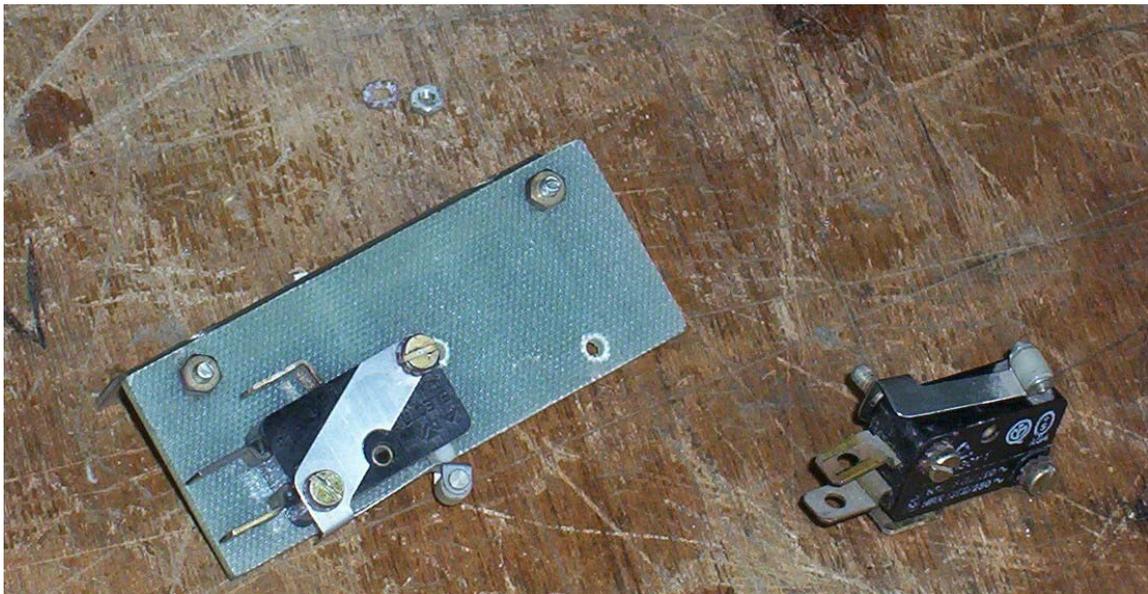


Figura 3.39 Microswitch de regulación de explosores.

Después de haber realizado esta calibración se reviso la tarjeta del modulo de la unidad de regulación y se observo que hacia falta una conexión a tierra entre la tarjeta y el potenciómetro digital con el cual se fija el voltaje de carga se reparo y se calibraron los potenciómetros para que cuando se llegara al voltaje de carga se detuviera y que presentara que había cargado al voltaje fijado y se encendiera el piloto ready para poder realizar el disparo manualmente, con todo esto funcionando el equipo se encuentra funcionando muy bien y esta listo para realizar las pruebas con los elementos de circuitos de distribución.



Figura 3.40. Calibración de los potenciómetros

### 3.14 Equipo de medición

Para poder montar el equipo de medición se realizo la instalación de un circuito de alimentación para todo este equipo, también se construyo un transformador de aislamiento para esta línea para que cuando se de una falla o una corriente de retorno no dañe el equipo de medición este transformador es de relación 1:1 para mayor información ver el anexo C esto se muestra en la siguiente figura.



Figura 3.41 tablero de alimentación con transformador de aislamiento.



Figura 3.42. Equipo de medición.

Este equipo es el que se está utilizando para poder obtener las mediciones en forma de onda del generador de impulso de alto voltaje para, poder obtener la señal de salida del divisor capacitivo es a través de un conductor especial el RG-11 (75 ohmios ) que además se acopla a una punta atenuadora fluke con una atenuación de 100:1 esta también se acopla a una protección que funciona a través de gas y que a su vez se acopla a otra protección primaria, estas protecciones se observan en las figuras 3.41 y 3.42.

En la siguiente figura se muestra el equipo que se instaló para tratar de medir la corriente de retorno de tierra.



Figura 3.43. Probador de corriente AC flexible 2000 (fluke i2000flex).

Este equipo posee dos rangos de medición de corriente los cuales son:

- a) 200 A 10 mV/A
- b) 2000 A 1 mV/A

Se utilizó el rango b para las mediciones de pruebas preliminares conectando en el otro extremo un tester digital para poder observar hasta que rango de voltaje se obtenía para poder determinar si se conectaba el osciloscopio sin que se dañara, esto se explicará con más detalles en el capítulo IV.

Se realizó la siguiente modificación en el equipo de medición de corriente se separó la dona del equipo de

instrumentación electrónica que realiza la conversión de corriente a voltaje y se colocó en la oficina de donde se encuentra el equipo de medición como se muestra en las siguientes figuras para ver si mejoraba la captura de la señal.



Figura 3.44. Dona de medición de corriente.

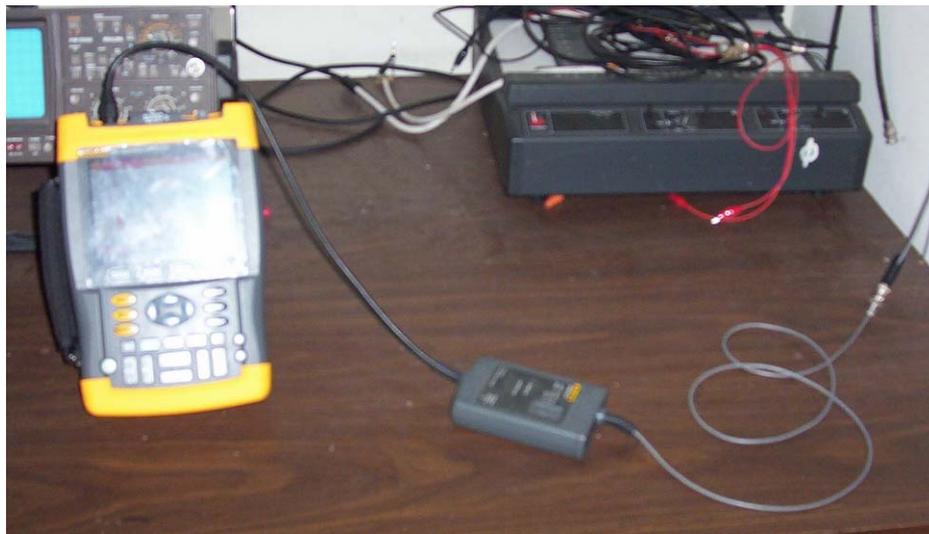


Figura 3.45. Convertidor de corriente a voltaje. Sistema de montaje del elemento de prueba esto se observa en la siguiente figura.



Figura 3.46a. Aislador de suspensión



Figura 3.46b. Cadena de 2 Aislador de suspencion



Figura 3.47 Aislador tipo pin

### 3.15 Procedimientos para realizar la prueba de impulso

#### Introducción

En las secciones anterior se presentó una descripción detallada del equipo existente que compone el laboratorio de la prueba de impulso, y su proceso de rehabilitación, aquí se expone cómo todos esos dispositivos se utilizan para llevar acabo las distintas pruebas que componen el ensayo de impulso. Esto resalta la importancia de la presente sección y se podría decir que este es el complemento de la anterior.

El objetivo aquí es presentar en forma breve, procedimientos relativos a la realización de la prueba de impulso con el equipo existente, tomando en cuenta las limitaciones que este posee.

En las primeras secciones se presentan procedimientos generales a cualquier tipo de prueba (reducida, completa, cortada, completa plena y frente de onda); luego se presentan pasos relativos a cada una de las pruebas antes mencionadas.

### 3.16 Determinación de la capacitancia a tierra ( $C_T$ )

Este valor es necesario conocerlo a fin de seleccionar la forma de conexión mas indicada para el generador de impulsos, el valor del voltaje de carga de las etapas y el valor de la resistencia de salida a fin de generar la forma de onda estándar y el voltaje de salida requerido por el objeto de prueba.

Se presenta un método para determinar el valor aproximado de la capacitancia a tierra en el espacio libre para un objeto determinado excepto para un conductor largo y delgado. Este valor se encuentra mediante la fórmula:

$$C_T = \frac{2\pi\epsilon_0(a+b+c)}{3} \quad \text{Ecu (3.1)}$$

Donde:

$$\epsilon_0 = \frac{1}{36\pi(10^{-9})} \quad \text{F/m} \quad \text{Ecu (3.2)}$$

a,b,c = Son las tres dimensiones del objeto en metros.

Para mayor información ver la referencia [2]

La proximidad a tierra y las paredes, así como el cielo del laboratorio incrementan el valor de capacitancia pero en un grado no muy alto. Aproximadamente 30 % y usualmente mucho menos.

Si el objeto de prueba tiene un electrodo en la parte superior (como un bushing de alto voltaje de un transformador), este tendrá su propio valor de capacitancia a tierra. En este caso es aceptable el considerar solamente el mayor de los dos valores de capacitancia que puedan obtenerse. Este valor solo es una aproximación, por lo que debe jugarse con el valor del resistor de salida si es necesario para poder obtener la onda estándar.

A continuación se presentan valores típicos aproximados de  $C_T$  de algunos objetos que se someten a la prueba de impulso, los cuales son:

- Aislador de suspensión y espiga 10-30 pF
- Aisladores tipo Bushing y para Cortacircuitos 150-400 pF
- Transformadores de corriente 200-600 pF
- Transformadores de potencia, hasta de 1 MVA A prox. 1000 pF

Para mayor información ver la referencia [3]

### 3.17 Determinación de la capacitancia de carga ( $C_b$ )

Es el valor de capacitancia de carga, el cual determina el tipo de conexión a utilizar en el generador de impulsos, así como también determina el valor al cual debe ajustarse la resistencia de salida a fin de obtener la onda estándar de 1.2/50  $\mu$ s.

El valor de capacitancia de carga ( $C_b$ ) viene dado por la suma del valor de capacitancia a tierra del objeto bajo prueba ( $C_T$ ), más el valor de capacitancia del divisor (4000 pF)<sup>14</sup>, es decir:

$$C_b = C_T + 4000 \quad [\text{pF}] \quad \text{Ecu (3.3)}$$

Donde:

$C_T$  debe expresarse en pF

### 3.18 Determinación de la conexión adecuada del generador

Ya determinado el valor de capacitancia de carga ( $C_b$ ) y conociendo el valor del voltaje máximo de salida requerido (esto depende del tipo de prueba), se determina la forma de conexión más adecuada y el valor al que debe ajustarse la resistencia de salida. Para esto debe hacerse referencia a la Tabla 3.2

Tabla 3.2. Rango de variación de la capacitancia de carga en función del valor ohmico del resistor de salida.

GENERADOR SERIE-PARALELO onda de 1,2/50 $\mu$ s			
ETAPAS	TENSIÓN	RESISTOR DE SALIDA	RANGO DE VARIACIÓN DE CAPACITANCIA DE CARGA
	KV	OHMIOS	pF
4SX1P	400	75	de 0 a 1600
		50	de 0 a 1900
		25	de 1900 a 5900
2SX2P	200	75	de 0 a 1800
		50	de 0 a 5200
		25	de 1900 a 6600
1SX4P	100	75	de 0 a 4600
		50	de 1900 a 8500

<sup>14</sup> Ver referencia [1]

La Tabla 3.2 muestra como la regulación del valor de la resistencia de salida permite obtener una variación continua de la capacitancia de carga dentro de los límites especificados para cada valor de resistencia a fin de obtener la forma de onda estándar<sup>15</sup>, según la referencia [4] la cual especifica

- Tiempo de frente 1.2  $\mu$ s  $\pm$  30 %
- Tiempo de cola 50  $\mu$ s  $\pm$  20 %
- Rebasamiento  $\pm$  5 % del valor de cresta

Tomando en cuenta para esto los parámetros del generador:

- Inductancia total del generador 40  $\mu$ H
- Capacitancia por etapas 0.5  $\mu$ F
- Resistencia de frente 12  $\Omega$
- Resistencia de cola 120  $\Omega$
- Resistencia salida 75  $\Omega$  (25+25+25)

Si para alguna conexión y para un valor de resistencia de salida específicos, se conecta a la salida del generador una capacitancia de carga menor que el límite inferior del rango de capacitancia de carga permisibles, se obtendrán impulsos con un tiempo de frente inferior a 0.84  $\mu$ s (o sea 1.2  $\mu$ s - 30 %), y con rebasamientos (overshoot) mayores del 5% del voltaje de cresta.

Si por el contrario se conecta una capacitancia de carga mayor que el límite superior del rango de capacitancias permisible, entonces se obtienen impulsos con un tiempo de frente mayor a 1.56  $\mu$ s (o sea 1.2  $\mu$ s + 30 %) y en este caso, sin embargo, el rebasamiento (overshoot) es menor del 5% y tenderá a anularse. El valor de la capacitancia de carga determina el valor al cual debe ajustarse la resistencia de salida, según se indica en la Tabla 3.2.

El valor de voltaje máximo de salida requerido es el que determina el tipo de conexión a utilizar. Esto se debe a que el voltaje de carga mínimo que es posible ajustar, teniendo un control efectivo de la distancia entre los explosores de las etapas, es 10 KV. Así, por ejemplo, si se desea probar el BIL de un transformador de distribución para el cual el devanado primario opera a un voltaje de 1.2 KV, su BIL esta especificado como de 30 KV para la onda completa y 36 KV para la onda cortada, Al observar la Tabla 3.2, en primera instancia podría pensarse que los voltajes de salida anteriores requeridos podrían obtenerse con cualquiera de las tres conexiones posibles:

---

<sup>15</sup> Ver capítulo II

CONEXIÓN

VOLTAJE DE SALIDA

4s x 1p	400 KV
2s x 2p	200 KV
1s x 4p	100 KV

Donde s significa etapas en serie y p en paralelo. Por ejemplo 4s x 1p significa que se cargan los cuatro capacitores en paralelo y se descargan como cuatro en serie.

Sin embargo al encontrar el voltaje de carga necesario para producir los voltajes de salida requeridos se obtendrían los siguientes valores:

Tabla 3.3. Voltajes de carga en función del tipo de conexión utilizada para voltajes de salida de 30 KV y 36 KV.

VOLTAJE DE SALIDA	VOLTAJE DE CARGA		
	4S X 1P	2S X 2P	1S X 4P
30 KV	7.5 KV	15 KV	30 KV
36 KV	9 KV	18 KV	36 KV

El voltaje de carga se obtiene al dividir el voltaje de salida requerido entre el número de etapas que quedarán conectadas en serie, según el tipo de conexión a utilizar: 4, 2 ó 1.

Así de la Tabla 3.3 puede observarse que la conexión, 4S x 1 no es aplicable en este caso ya que el voltaje de carga es menor de 10 KV para esa conexión, por lo tanto puede utilizarse cual quiera de las otras dos conexiones.

Aunque si bien se detalla posteriormente, es importante aclarar desde ya que el tipo de conexión a utilizar y de aquí el voltaje de carga que se utilizará determinan el número de impulsos consecutivos que pueden obtenerse del generador por minuto, por lo que esto también debe tomarse en cuenta a la hora de seleccionar el tipo de conexiones a utilizar. (véase la sección 3.19.2.).

En el ejemplo presentado anteriormente un voltaje de carga de 30 KV permite que se produzcan 8 impulsos por minuto aproximadamente con un espacio de 7.5 segundos entre impulsos consecutivos, mientras que para un voltaje de carga de 15 KV permitiría un número mayor de impulsos.

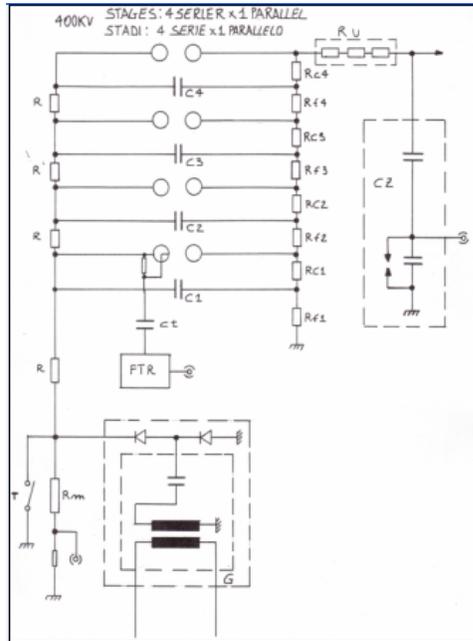
Debido a la ionización del aire al irse dando los impulsos consecutivos, es recomendable trabajar con voltajes de carga de 30 Kv ó superiores ya que como en este caso la distancia

entre los explosores es mayor, se obtiene una mayor repetitividad del voltaje de carga alcanzado, sin un gran riesgo de que se produzcan descargas aleatorias como resultado de las condiciones climatológicas.

Los diagramas para las diferentes formas de conexión se muestran en la figura 3.48

Para la conexión 4s x 1p no debe realizarse ningún cambio pues es en esta conexión que se encuentra instalado el equipo.

Para la conexión 2s x 2p y 1s x 4p si deben realizarse algunos cambios y realizar algunos puentes. Para realizar estos puentes se deben utilizar de preferencia varillas sólidas de aluminio, aunque también puede utilizarse varillas sólida de cobre teniendo el cuidado de mantener libres de suciedad y óxido los extremos de las mismas.



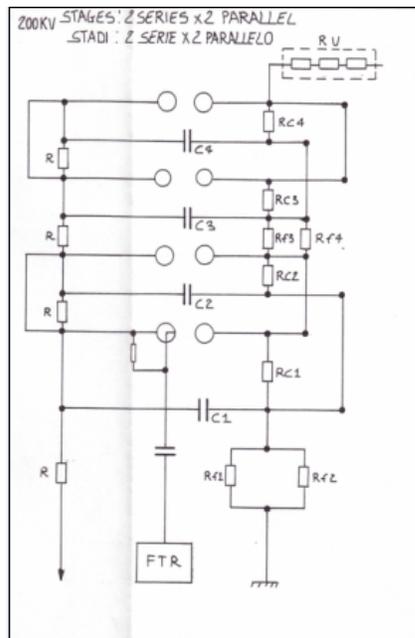
a)

a) 400 KV. Etapas: 4 serie x 1 paralelo

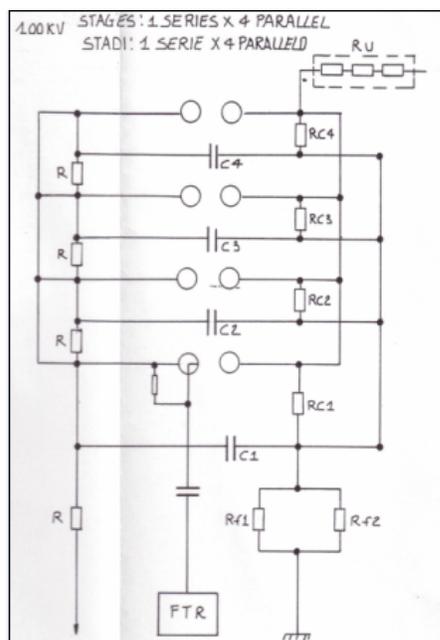
Donde:

- |   |                                     |
|---|-------------------------------------|
| $R_{f\ 1...4}$ : Resistencias de frente | $R_{c1...4}$ : Resistencias de cola |
| $R$ : Resistencias carga                | $R_v$ : Resistencia de salida       |
| $R_m$ : Resistencias de medida          | $G$ : Generador DC                  |
| $T$ : Dispositivo de tierra             | $C_{1...4}$ : Capacitor de etapa    |
| $C_t$ : Capacitor trigaton              |                                     |

Figura 3.48. Diagrama del circuito para el generador de impulso tipo GTS-04



b) 200 KV. Etapas: 2 serie x 2 paralelo



c) 100 KV. Etapas: 1 serie x 4 paralelo

Figura 3.48. Continuación

### 3.19 Generación del impulso de tensión

Esto implica una serie de pasos los cuales iremos describiendo individualmente y para lo cual se hará referencia a las distintas secciones del banco de mando.

#### 3.19.1 Ajuste del voltaje de carga y su polaridad

Tal como se mencionó en la sección 3.18, el voltaje de carga se determina dividiendo el voltaje de salida requerido entre el número de etapas del generador que quedarán conectadas en serie (4, 2 o 1).

Otro dato que ya debe conocerse es el que se refiere a la polaridad del voltaje de salida requerido. Esto en general lo determina el objeto a ser sometido a prueba. Para equipos inmersos en aceite se recomienda la polaridad negativa y para equipos tipo seco se recomienda la polaridad positiva<sup>16</sup>.

Una vez encontrado el valor del voltaje de carga, este se fija con el potenciómetro digital (VOLTAGE SETTING), ubicado en la sección de regulación. Si el voltaje de carga es menor ó igual a 50 KV, entonces el conmutador VOLTAJE RANGE (LOW/HIGH), debe estar en la posición low; si por el contrario el valor del voltaje de carga es mayor de 50 Kv, entonces el conmutador debe estar en la posición HIGH. Ver referencia [3].

Para seleccionar el tipo de polaridad a utilizar debe operarse una manivela ubicada en el generador de impulsos en uno de los extremos del compartimiento que contiene los diodos rectificadores y que se ubica sobre el generador DC.

Asumamos que el generador está entregando voltaje de polaridad positiva, entonces la manivela estará presionada y girada en sentido antihorario. Al querer girarla más en este sentido no se podrá, pues dispone de un limitador de giro. En la consola de control, específicamente en la sección de servicios se encontrara encendida la luz indicadora de la polaridad positiva. Si ahora queremos cambiar a polaridad negativa, entonces la manivela que este momento está ajustada para polaridad positiva, debe girarse en sentido horario hasta que tope con el limitador de giro en este sentido y no gire más, entonces debe tirarse de ella hacía afuera hasta que se tiene por la acción de un limitador de desplazamiento y ya no es posible halarla más. En la consola

---

<sup>16</sup> Esto se mencionara en el capítulo IV

de control, en la sección de servicios se encontrará encendida la luz que indica que se está generando con polaridad negativa.

### 3.19.2 Ajuste del tiempo entre impulsos sucesivos

El generador de impulsos puede producir un impulso cada vez que sea disparado manualmente desde la unidad de disparo, o bien producir un número de impulsos previamente fijado debiendo para esto dispararlo solo para el primer impulso, produciéndose automáticamente los impulsos restantes. Sin embargo no importa cual de los modos de operación se esté utilizando debe existir un intervalo de tiempo entre impulsos sucesivos y esto se debe a la capacidad térmica de las resistencias.

Para encontrar el tiempo requerido entre impulsos sucesivos, el cual depende del voltaje de carga a utilizar, se usa la curva que se muestra en la figura 3.49.

En la ordenada de la figura, se indica la tensión de carga y en las abscisas se indica el número de impulsos por minutos y el intervalo, en segundos entre impulsos sucesivos.

Es importante respetar el ritmo que se obtiene del diagrama anterior a fin de que la demanda térmica de los resistencias sea adecuada. Por ejemplo si se efectúan impulsos con tensión de carga de cada etapa de 60 KV, no deben efectuarse más de 6 impulsos por minuto, con un intervalo de 10 segundos entre ellos. Si la tensión de carga de cada etapa es de 100 KV solo deben efectuarse 2 impulsos por minuto, con un intervalo de tiempo de 30 segundos entre ellos.

Este ritmo tiene validez ilimitada en cuanto al número de impulsos consecutivos.

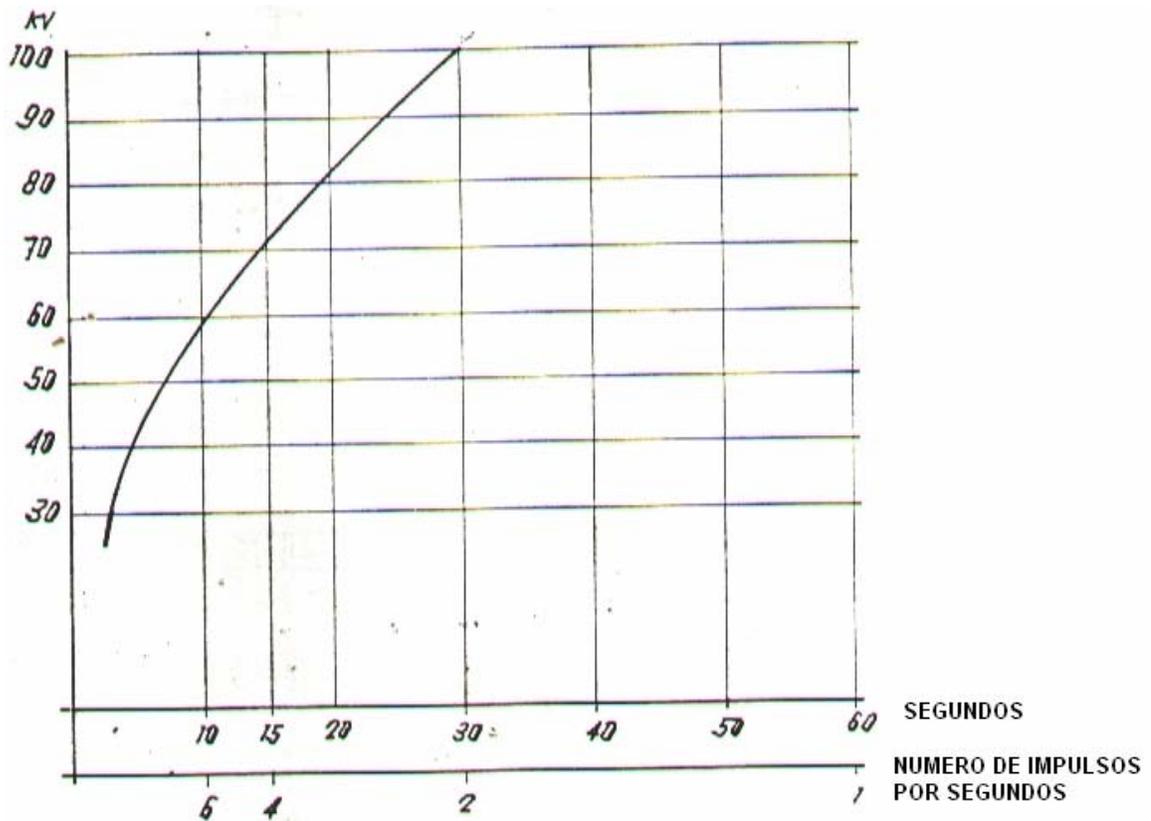


Figura 3.49. Relación entre tensión de carga y el ritmo entre impulsos sucesivos.

Se puede aumentar el número de impulsos por minuto, pero no sobrepasar los límites de capacidad térmica de las resistencias, es necesario efectuar pausas. Por ejemplo, se puede duplicar el número de impulsos, pero después de una serie de 6 impulsos, se necesita una pausa de 10 a 15 minutos antes de empezar una serie igual de impulsos.

- Para fijar el tiempo entre impulsos sucesivos debe utilizarse un control ubicado en la sección de regulación del banco de mando y rotulado TIME INTERVAL. Para aumentar el tiempo debe girarse en sentido horario para disminuirlo en sentido antihorario. Asociada a este control y ubicada a la par de este, se encuentra una luz amarilla la cual mientras esté encendida indica que debe esperarse el tiempo fijado antes de iniciar un nuevo proceso de carga. Mientras la luz esté encendida el proceso de carga no se iniciará aún cuando se presione el control de inicio de carga.

También en la unidad de regulación se encuentra el control SHOT NR, con el cual se fija el número de impulsos que se producirán automáticamente, en el caso que se desee este modo de operación. Cada vez que se produzca un impulso el control disminuye en uno el número de disparos fijado, cuando se llega al valor cero, el equipo es puesto a tierra, y no puede iniciarse un nuevo proceso de carga hasta que el valor del SHOT NR sea diferente de cero.

### **3.19.3 Ajuste de la distancia entre los explosores de las etapas**

En realidad desde la consola de mando se tiene una lectura directa de la distancia entre los explosores de la primera etapa. Pero como el mecanismo de árbol giratorio engranaje, acoplado al motor de giro de doble sentido produce un movimiento sincronizado para todas las etapas. Indirectamente se tiene un control de la distancia en los explosores de las tres etapas restantes. La lectura de la distancia en mm del explosor de la primera etapa se obtiene en el lado derecho de la sección de servicios de la consola de mando, específicamente en el control rotulado SPHERE GAP DISTANCE, Para ajustar la distancia entre los explosores, esto puede hacerse en dos formas:

#### **a) En forma automática**

En esta opción la distancia entre los explosores es ajustada por un mecanismo automático instalado en la consola de mando en proporción al voltaje de carga fijado. A más voltaje de carga, mayor distancia y a menor voltaje de carga menor distancia.

Para obtener el modo de operación automático debe girarse el conmutador AUTO/MAN, a la posición AUTO. Puede tenerse un pequeño incremento en la distancia (hasta del 7 %), al girar en sentido horario el control rotulado REG ADJ; o bien disminuir en una pequeña cantidad la distancia fijada (hasta un 7%), al girar el control sentido antihorario.

Es importante mencionar que el control REG.ADJ, solo tiene efecto con distancias correspondientes a voltajes de carga mayores que 10 Kv. En las pruebas realizadas se ha observado que el modo de ajuste automático no es muy efectivo a bajos voltajes de carga ya que debido a efectos tales como la densidad del aire y la humedad de este, pueden producirse descargas prematuras, es decir estas descargas se dan sin completarse el voltaje de carga fijado. Por esta razón es mejor utilizar el modo de ajuste manual.

**b) En forma manual**

Para este modo de ajuste el conmutador AUTO/MAN debe girarse a la posición MAN. En este modo de operación la distancia entre los explosores se ajustan manualmente con el control rotulado MAN. CONTROL.

- El botón de la izquierda aumenta la distancia.
- El botón de la derecha disminuye la distancia.

La distancia debe ajustarse en forma proporcional al voltaje de carga, leyéndose la distancia que se ha ajustado en el control rotulado SPHERE GAP DISTANCE.

Para encontrar la distancia debe hacerse referencia a la Tabla 3.4.

Tabla 3.4. Distancia de los explosores en función de los voltajes de carga.

TENSIÓN DE CARGA (KV)	DISTANCIA ENTRE ESFERAS (mm)
10	4.5
20	9.0
30	13.5
40	18.0
50	22.5
60	27.0
70	31.5
80	36.0
90	40.5
100	45.0

Una vez más se aclara que las distancias anteriores solamente son valores de referencia. Para ajustar la distancia adecuada deben hacerse las pruebas que sean necesarias hasta ajustar el valor adecuado. Para comprobar si la distancia es correcta, debe darse la orden de carga y observar si el voltaje de carga alcanza el valor fijado y espera la orden de disparo manual. Si no es así la distancia debe irse aumentando gradualmente.

Para iniciar el proceso de carga deben seguirse el paso siguiente:

- Verificar que el valor del SHOT NR, sea diferente de cero.

- En la unidad de servicios se encuentran además de los controles para ajustar la distancia entre los explosores de las etapas, los controles del interruptor de aterrizaje y el interruptor de carga.

Para iniciar la carga, antes debe liberarse el sistema de puesta a tierra. Para esto debe presionarse el pulsador de color rojo. Este mecanismo no funcionará si no existe, la presión de aire necesaria. Si esto es así se encenderá una luz de color amarilla NO AIR, por lo tanto deberá ponerse en funcionamiento el compresor estando su válvula de salida cerrada y debe esperar hasta que el por si mismo se desconecte. En este momento puede abrirse la válvula para permitir que pase la presión de aire requerida y así la luz amarilla se apagará.

Una vez verificado lo anterior puede iniciarse el proceso de carga. Inicialmente el switch de carga (CHARGING SWITCH), tendrá el pulsador de luz verde encendido, lo que indica que el interruptor de carga está abierto. Para dar la orden de carga debe presionarse el pulsador rojo, el cual se encenderá y hará que el pulsador verde se apague, si el tiempo entre impulsos sucesivos aún no se ha cumplido estará encendida la luz amarilla ubicada en la sección de regulación y así aún cuando el pulsador rojo este iluminado el proceso de carga no se iniciará hasta que se apague la luz amarilla. Si la luz amarilla está apagada y se presiona el pulsador rojo transcurrirán un par de segundos antes de que se inicie el proceso de carga. Si la distancia entre los explosores de las etapas es la adecuada, entonces al completarse el voltaje de carga en la unidad de regulación se encenderá una luz roja rotulada READY, la cual indicará que el, generador está esperando la señal de disparo. Si se producen descargas prematuras entonces debe ponerse a tierra el equipo, y ajustar la distancia entre los explosores, e iniciar un nuevo proceso de carga hasta que el funcionamiento sea el adecuado.

Para poder realizar el disparo del generador al encenderse la luz READY, debe estar energizada la unidad de disparo. Si está energizada estará iluminado el pulsador rojo MAIN de lo contrario debe presionarse.

En la unidad de disparo se encuentra un pulsador de disparo manual (MANUAL FIRING), el cual al presionarlo manda el pulso que habilita el disparo del generador. Entonces al estar encendida la luz roja READY, se puede presionar este pulsador para disparar el generador.

### 3.19.4 Medición del valor de cresta

El voltaje de cresta es el valor del voltaje de salida que se requiere para realizar la prueba. El voltaje de salida teórico se obtiene al multiplicar el voltaje de carga fijado por el número de etapas que se conectan en serie en el momento del disparo. Sin embargo debe comprobarse si el voltaje de salida producido por el generador es el requerido, para esto debe hacerse la medición del voltaje de cresta haciendo uso del espinterómetro de medición.

Para medir el voltaje de cresta se produce el disparo del generador, con el espinterómetro de medición conectado al capacitor de carga/divisor y el objeto de prueba removido. La distancia entre las esferas del explosor de medición debe ajustarse según el valor de voltaje de cresta a medir, tomando en cuenta las condiciones atmosféricas prevalecientes en el momento de realizar la prueba y haciendo uso de las tablas 2.7 y 2.8.

Una vez determinada la distancia a la que deben colocarse las esferas del espinterómetro esta puede ajustarse utilizando LA UNIDAD DE CONTROL DEL ESPINTEROMETRO DE MEDICIÓN. Para energizar esta sección debe estar presionado el pulsador MAIN y a la vez debe estar sin energía la unidad de disparo pues de lo contrario la unidad de control del espinterómetro no funciona.

En EL DISPLAY INDICADOR DE LA DISTANCIA ENTRE ESFERAS, se presenta la distancia existente entre las esferas.

Para modificar la distancia entre las esferas debe utilizarse el control que consta de dos pulsadores:

- El de la izquierda disminuye la distancia entre las esferas (flechas hacia arriba).
- El de la derecha aumenta la distancia entre las esferas (flechas hacia abajo),

Haciendo uso de este control se ajusta la distancia entre las esferas hasta que coincida con el valor encontrado de la distancia.

Luego entonces debe producirse el disparo del generador mediante el procedimiento presentado en la sección de ajuste de la distancia entre los explosores de las etapas. Si da el flameo entonces debe guardarse el dato de las distancia entre las esferas, luego aumentar gradualmente la distancia e ir disparando el generador hasta ubicar el punto preciso de flameo (ver sección 2.18.1). Si no se da la descarga

entonces la distancia debe, disminuirse gradualmente hasta encontrar nuevamente el punto preciso de flameo. En uno u otro caso lo que se esta haciendo es medir el voltaje de salida real producido por el generador y comprobar si este cumple con el voltaje de salida requerido.

Ahora como se conoce la distancia entre las esferas a la cual se da el flameo se encuentra el valor de voltaje de salida utilizando las tablas 2.7 y 2.8, según sea el caso. Sin embargo como estas tablas están dadas para condiciones estándar, para encontrar el valor real de voltaje, que bajo las condiciones de prueba existentes produce el flameo. El voltaje encontrado en la tabla con la distancia conocida, debe modificarse con los factores de corrección.

### **3.19.5 Conexión del objeto de prueba**

Los objetos de prueba que en este trabajo se consideran se limitan a transformadores de distribución, aisladores de suspensión y de espiga. Independientemente, de cual de ellos se trate, siempre deben conectarse entre una derivación sacada del divisor y tierra. Esta derivación consiste de un cable de corta longitud a efecto de reducir la inductancia del mismo.

- Para aisladores de suspensión, el cable conectado al divisor debe conectarse al extremo del aislador que sostendrá el cable cuando está en operación, mientras que el extremo donde el aislador se sujeta al poste o al crucero debe conectarse a tierra.

Para los aisladores de espiga el cable conectado al divisor debe sujetarse a "la cabeza", del aislador mientras que el soporte del aislador se conecta a tierra.

- En el caso de los transformadores, el devanado a ser sometido a prueba, un extremo del devanado a probar se conecta al divisor y el otro extremo se conecta a tierra. Los devanados que no están siendo sometidos a prueba deben conectarse a tierra directamente, ó bien a través de resistencias.

La conexión del objeto de prueba se explicará en detalle en el próximo capítulo en donde se trata el procedimiento y análisis de los oscilogramas obtenidos al someter a prueba los aisladores y transformadores. Por el momento lo importante es señalar que no importa de que objeto se trate este deberá conectarse entre la derivación instalada al divisor y tierra, siendo esta derivación lo más corta

posible a fin de reducir la inductancia a fin de evitar oscilaciones las cuales se superponen a la onda impulso.

### 3.20 Verificación de la forma de onda

Tal como se mencionó en capítulos anteriores, se ha estandarizado la forma de onda para la prueba impulso. La cual debe tener un tiempo de frente de  $1.2 \mu\text{s} \pm 30\%$ , y un tiempo de cola de  $50 \mu\text{s} \pm 20\%$ . Como el objeto bajo prueba influye sobre la forma de onda, una vez conectado el objeto de prueba debe verificarse si la forma de onda cumple con lo que especifican las normas.

Para verificar la forma de onda debe producirse un impulso cuyo voltaje de cresta no exceda el 50% del BIL especificado para el equipo bajo prueba. En base a este valor de voltaje de cresta deben seguirse los pasos de la sección 3.19, a fin de generar el impulso de tensión, debiendo además tomar en cuenta los pasos descritos en esta sección a fin de sincronizar el disparo del osciloscopio y poder así guardar la forma de onda para su posterior análisis.

Debido al pequeño tiempo de duración de la onda de impulso, para poder verificar su forma de onda debe poseerse un dispositivo capaz de memorizar esta forma de onda. Este dispositivo es un osciloscopio con memoria, sin embargo para una sincronización entre el disparo del osciloscopio y el disparo del generador, debe dispararse el generador unos micro segundos después que se ha disparado la sección de barrido horizontal del osciloscopio.

Como la verificación de la forma de onda del impulso supone que el osciloscopio se encuentra ya instalado y esto no ha sido tratado hasta el momento, se expone a continuación:

#### 3.20.1 Instalación del osciloscopio

La carcasa del osciloscopio debe estar conectada a la tierra del laboratorio, en un punto sobre la carcasa destinado para este fin. Este punto variara según el tipo de osciloscopio de que se disponga.

### 3.20.2 Conexión del osciloscopio al cable de medición

Los osciloscopios utilizados en este tipo de prueba tienen conectores apropiados para alojar el conector que proviene del cable de medición. Por lo que habrá de remitirse al manual del osciloscopio disponible para su instalación.

### 3.20.3 Disparo del osciloscopio

El conector BNC ubicado en la sección de disparo debe conectarse el cable CR1 proveniente del banco de mando.

### 3.20.4 Almacenamiento de la onda de impulso

Es necesario almacenar en la memoria del osciloscopio los impulsos aplicados a fin de obtener oscilogramas de los mismos, la forma de almacenamiento dependerá del osciloscopio utilizado.

### 3.20.5 Verificación de la forma de onda

Cuando ya ha sido almacenada la señal, debe verificarse si cumple con los estándares. Es decir el tiempo de frente debe tener un valor entre 0.84  $\mu\text{s}$  y 1.56  $\mu\text{s}$  para cumplir con la tolerancia de  $\pm 30\%$ . Para medir el tiempo de frente se utiliza la ecuación:

$$T_f = 1.67(T_{90\%} - T_{30\%}) \quad \text{Ecu (3.4)}$$

En donde  $(T_{90\%} - T_{30\%})$  es el intervalo de tiempo entre los puntos cuando la onda alcanza el 30% y el 90%, del valor pico. El tiempo de valor medio debe tener un valor entre 40  $\mu\text{s}$  y 60  $\mu\text{s}$ . Para cumplir con la tolerancia de  $\pm 20\%$  y corresponde al tiempo al que la onda ha caído al 50%, del valor pico. Si la forma de onda no cumple con estos estándares, deberá probarse con otro valor del resistor de salida, según se describió en la sección 3.18. Si se dan oscilaciones cerca del valor pico, debe verificarse que estas no excedan el 5% del valor pico.

### 3.21 La prueba de onda completa

La prueba de onda completa consiste en la aplicación de la onda estándar de  $1.2 / 50 \mu s$ , (véase la figura 2.1 capítulo II), al equipo a someter a prueba. La prueba de onda completa puede ser de dos tipos:

- Prueba de onda completa reducida.
- Prueba de onda completa plena.

Para la realización de ambos tipos de pruebas se supone que ya se han realizado los pasos descritos, en las secciones 3.16 a 3.20, los cuales finalizan con la obtención de la onda de impulso estándar, es decir, para realizar la prueba antes debe de comprobarse que se está obteniendo la onda estándar para el objeto sometido a prueba.

#### 3.21.1 Prueba de onda completa reducida

La prueba de onda completa reducida consiste en la aplicación al objeto bajo prueba de una onda estándar completa cuyo voltaje de cresta este comprendido entre el 50%, y el 70% del valor de BIL del equipo a ser sometido a prueba.

El procedimiento para la prueba de onda completa reducida es el mismo que se describió en las secciones 3.19 y 3.20. El paso descrito en la sección 3.19.4 (MEDICIÓN DE EL VOLTAJE DE CRESTA) puede no realizarse, lo que evitará la necesidad de conectar y desconectar el objeto, bajo prueba, si se toman las medidas a fin de que el voltaje de cresta esté en el rango establecido. Para esto debe seleccionarse un voltaje de carga que esté comprendido entre los voltajes de carga necesarios para producir el 50%, y el 70%, del BIL especificado.

El paso 3.20.6 VERIFICACIÓN DE LA FORMA DE ONDA, no es necesario realizarlo ya que aquí se supone que ya se está generando la onda estándar.

El proceso de análisis vendrá dictado por normas aplicables al equipo sometido a prueba. Basta en este momento decir que el objetivo de realizar la onda reducida es para comparar su oscilograma con el correspondiente a la prueba de onda completa.

### 3.21.2 Prueba de onda completa plena

La prueba de onda completa plena consiste en la aplicación al objeto bajo prueba de una onda estándar completa cuyo voltaje de cresta corresponda al 100% del BIL especificado para el equipo a someter a prueba. El procedimiento para la prueba de onda completa plena es el mismo que se describió en las secciones 3.19 y 3.20. Nuevamente el paso de verificación de la forma de onda no debe realizarse, solamente debe memorizarse la forma de onda en el osciloscopio y compararla con la correspondiente a la onda completa reducida a fin de detectar cualquier indicio de falla, según lo indiquen las normas correspondientes.

### 3.22 Prueba de onda recortada

Cuando se aplica a transformadores, ella simula el efecto que produce en los bobinados del transformador al darse el flameo de un aislador, un explosor, un pararrayos ó alguna otra protección cercana al transformador cuando un rayo cae en la línea.

Al igual que para la prueba de onda plena se supone que ya se han realizado los pasos descritos en las secciones 3.16 y 3.20, a fin de obtener la forma de onda estándar.

La prueba de onda recortada consiste en la aplicación de una onda completa la cual se recorta en un tiempo comprendido, por lo general, entre 4 y 6  $\mu\text{s}$  después del inicio del impulso. El dispositivo de recorte puede ser un explosor, o bien un dispositivo electrónico sofisticado (TRIGATRON), que es con el que podríamos producir el recorte.

Para producir el recorte de la onda con el trigatrón debe existir una sincronización entre el disparo del osciloscopio, el generador y el dispositivo de recorte, tal como se muestra en la figura 3.50.

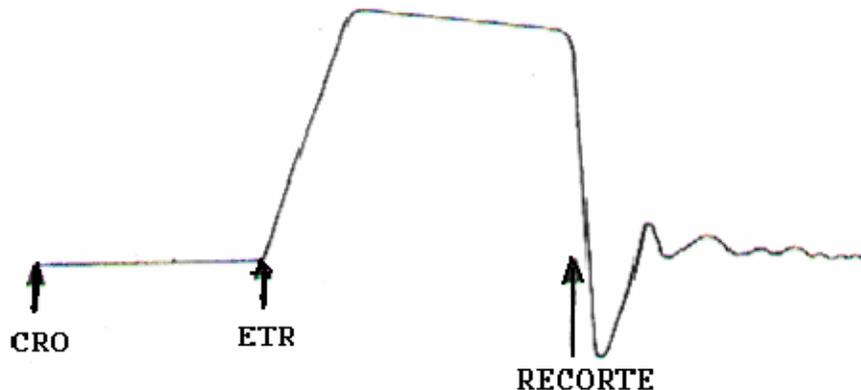


Figura 3.50. Sincronización entre los disparos del osciloscopio, el generador y el objeto de prueba.

Para realizar la sincronización deberá hacerse pruebas a voltaje reducido hasta que se obtengan los intervalos de tiempo indicados, que deben existir entre el disparo del osciloscopio y el disparo del generador y entre el disparo del generador y el disparo del dispositivo de recorte respectivamente.

El intervalo de tiempo entre el disparo del osciloscopio y el disparo del generador, se fija con el potenciómetro digital RELEASE DELAY.

Para poder activar el dispositivo de recorte debe presionarse el pulsador luminoso CHOPPING CONTROL, el cual al ser presionado se iluminará. Obviamente este debe de presionarse antes de presionar el pulsador de disparo del generador. El intervalo de tiempo entre el disparo del generador y el disparo del dispositivo de recorte se fija con el potenciómetro digital CHOPPING DELAY.

El procedimiento para la generación de la onda es el mismo que se describe en las secciones 3.19 y 3.20, con la salvedad de que ahora debe sincronizarse el disparo del osciloscopio, el generador y el dispositivo de recorte, y con un valor de cresta correspondiente a esta prueba<sup>17</sup>, según el procedimiento descrito anteriormente en esta sección.

<sup>17</sup> Ver tablas correspondientes a pruebas de onda cortada en el capítulo IV

### 3.23 Prueba de frente de onda

La prueba de frente de onda simula una descarga atmosférica directa o muy cercana al transformador, lo que causa que se produzca una repentina subida del voltaje en los terminales del transformador, hasta que actúe un dispositivo de protección.

Si este dispositivo es un pararrayos, la subida de voltaje será considerablemente menor.

El procedimiento para llevar a cabo la prueba de frente de onda es el mismo que el que se describió en las secciones 3.19 y 3.20, para lo cual ya se asume que se tiene la forma estándar de 1.2/50  $\mu$ s. El valor del voltaje de cresta que debe poseer la onda a generar viene especificado en tablas<sup>5</sup>, dependiendo este valor de la clase de aislamiento correspondiente al transformador sometido a prueba. En estas tablas también se especifica el tiempo que debe transcurrir desde el momento del disparo del generador hasta el momento en que se produce el recorte de la onda en el frente.

Como en el caso de la onda recortada, debe darse una sincronización entre el disparo del osciloscopio, el generador y el dispositivo de recorte siguiendo el mismo procedimiento descrito en la sección 3.22, con el tiempo para el recorte ajustado según lo indique la tabla ya mencionada.

### CONCLUSIONES DEL CAPITULO III

Siempre que se quiere operar un equipo de una complejidad considerable, es necesario conocerlo bien, saber que partes lo conforman, condiciones de instalación, modos de operación, condiciones de seguridad y sus limitaciones. Esto no es la excepción para el equipo destinado al laboratorio de ensayo de impulsos de alto voltaje; aquí con más razón se debe tener un amplio conocimiento de él ya que están en juego grandes cantidades de voltaje y energía, y un desconocimiento de parte del equipo, podría poner en peligro la vida de personas y del equipo mismo.

El laboratorio de prueba de impulso de la Escuela de Ingeniería Eléctrica dispone de un buen equipo para la realización de la prueba, el cual sin embargo, debe complementarse con equipo adicional a fin de poder prestar un servicio eficiente y confiable de las pruebas que se realizan.

Es necesario tener en cuenta y cumplir las instrucciones de mantenimiento y seguridad, ya que el no cumplimiento de tales instrucciones acortaría la vida del equipo, como también produciría resultados no deseados de este (mal funcionamiento).

No se pueden dar procedimientos definitivos para la realización de la prueba de impulso, los pasos aquí propuestos son una guía para comenzar el desarrollo del laboratorio de la prueba impulso en la Escuela de Ingeniería Eléctrica; ya que solamente la práctica, y la experiencia adquirida con esta será la que en definitiva presente procedimientos más confiables y certeros para la realización de la prueba impulso.

Las limitaciones que el laboratorio posee están dirigidas a la realización de pruebas húmedas, y protecciones al momento de realizar las pruebas.

En el laboratorio se pueden realizar todas las pruebas de onda como por ejemplo pruebas completas (prueba de onda completa plena y reducida).

Con el laboratorio existente se puede probar equipos con un BIL de hasta 100 Kv, debido que se cuenta con un osciloscopio diseñado para este fin.

## REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- [1] - Passoni Villa. Manual de utilización del Generador de Impulsos. Traducido y adaptado por Ing. José Fredy Villalta  
Milano Italia.1988.
- [2] - Nils Hyllén-Cavallius  
High Voltage Laboratory Planning  
Basel-Switzerland  
Published by High Voltage Test System  
ASEA HAEFFELLY 1986
- [3] - Escobar Arevalo, José Domingo y otras  
" Diseño de un generador de impulsos "  
Tesis para optar al grado de ingeniero electricista,  
Universidad Centroamericana "José Simeón Canas"  
UCA. 1986
- [4] - International Electrotechnical Commission IEC.  
Publication 60.1. High Voltage Test Techniques  
Part 1:General definition and test requirements  
Second edition 1989.
- [5] - IEEE Standar Techniuee for High-voltage testing.  
IEEE Std 4-1978. Sexta Edición 1977.
- [6] - International Electrotechnical Commission IEC.  
Publication 60.2. High Voltage Test Techniques  
Part 2: Test procedure.  
Suiza. Primera Edición 1973.
- [7] - International Electrotechnical Commission IEC.  
Publication 60.3. High Voltage Test Techniques  
Part 3: Measuring devices  
first edition 1976.
- [8]- Chevez Paz Luis Roberto.  
Colato Rodríguez Hugo Miguel  
Escobar Brizuela Luis Ernesto  
"Diseño e Implementacion de un Sistema de Adquisicion y  
Procesamiento de Datos de las pruebas realizadas con un  
Generador de Impulsos de Alta Tension".  
Tesis Para Optar al Grado de: Ingeniero Electricista  
Biblioteca de las ingenieria.  
UES diciembre de 1996.

- [9]- Campos Miranda Osbaldo Adolfo.  
Galdamez Garcia Jorge Alberto.  
"Generador de Impulsos de Alto Voltaje Aplicaciones  
Industriales y Manual de Operación".  
Tesis Para Optar al Grado de: Ingeniero Electricista  
Biblioteca de las ingenieria.  
UES Enero de 1991.

## CAPITULO IV

### LA PRUEBA DE IMPULSO EN AISLADORES Y TRANSFORMADORES.

#### Introducción

En el capítulo II y III, se describió el equipo disponible para la realización de la prueba al impulso, las partes que lo conforman su funcionamiento y su rehabilitación después de tanto tiempo de estar fuera de uso y/o servicio.

En el presente capítulo se pretende desarrollar lo que en sí se espera del equipo: realizar la prueba al impulso en Aisladores y transformadores de los tipos más utilizados en las redes de distribución de en El Salvador. El capítulo entonces, se divide en dos grandes partes o secciones referentes a la realización de la prueba al impulso en aisladores y la realización de la prueba al impulso en transformadores.

La realización de la prueba en transformadores será únicamente académica puesto que no se cuenta con el equipo auxiliar necesario para hacer pruebas. Por otro lado no se cuenta con un sistema de seguridad adecuado en las instalaciones del laboratorio, para proteger al personal de posibles daños que puedan poner en peligro la vida de estos.

#### 4.0 La prueba al impulso en Aisladores

##### 4.1 Generalidades

<sup>18</sup>La prueba en aisladores no se limita únicamente a lo que es la prueba al impulso en seco sino que también puede realizarse pruebas en estos tanto de choque térmico, como ensayos bajo lluvia y contaminación, esto como una aclaración. Con el equipo disponible se puede hacer en este momento únicamente la prueba en seco pues como se dijo

---

<sup>18</sup> Tanto las definiciones, así como también los procedimientos para la prueba han sido extraídos de la norma ANSI C29-1961 ver referencia [1]

anteriormente no se cuenta con el equipo auxiliar necesario para este tipo de pruebas, únicamente se describen los procedimientos. Dichas pruebas se describirán en este capítulo, pero antes se presentan algunas definiciones relativas a los aisladores a fin de distinguir claramente los diferentes tipos de aisladores a considerar.

#### **I- Aislador**

Un aislador es un soporte no conductor, el cual sirve de sostén a un conductor eléctrico.

#### **II- Aislador tipo pin**

Un aislador tipo pin es un aislador el cual dispone de medios para poder montarse rígidamente en un soporte metálico el cual se conoce como pin.

#### **III-Aislador tipo poste**

Un aislador tipo poste es un aislador cuya forma es generalmente columnar, teniendo medios para un montaje rígido directamente al poste.

#### **IV- Aislador de suspensión**

Un aislador de suspensión es un acople de una o mas unidades aisladoras con forma circular, las cuales disponen de medios para un acople no rígido entre ellas, y que a la vez disponen de un medio para soportar en forma no rígida conductores eléctricos.

### **4.2 La prueba de choque térmico (Termal Shock)**

La prueba de choque térmico consiste en la inmersión en forma alterna del especimen de prueba en agua fría y agua caliente.

#### **4.2.1 Arreglo para la prueba**

Los objetos de prueba deben disponerse de tal forma que no hagan contacto unos con otros y cuidar además de que no se atrape aire durante su inmersión. Debe proveerse la libre circulación de agua. El objeto de prueba debe estar separado al menos 2 pulgadas de las paredes del tanque.

#### 4.2.2 Equipo para la realización de la prueba

Cada baño de agua debe tener un peso de al menos 10 veces el peso de los objetos de prueba. Puede utilizarse circulación natural o forzada para mantener uniforme la temperatura en todo el baño de agua. La temperatura debe medirse a una distancia de 4 pulgadas de la fuente de calor o de enfriamiento.

#### 4.2.3 Método para realizar la prueba

Los objetos de prueba deben sumergirse primero en agua caliente por 10 minutos y luego sumergirse en agua fría por otros 10 minutos. Después que se ha terminado el número de ciclos caliente y frío especificado para el objeto bajo prueba, entonces este puede someterse a la prueba impulso.

No debe transcurrir más de 5 segundos en transferir los aisladores de prueba, de un baño al otro. Deben completarse 10 ciclos debiendo ser el último baño el de agua fría.

La única diferencia en la realización de la prueba para los distintos aisladores consiste en la temperatura a la que debe mantenerse el baño de agua caliente. La temperatura para el baño de agua fría, para cualquiera de los aisladores debe ser aproximadamente 4 grados centígrados.

El baño de agua caliente deberá tener una temperatura aproximada de:

Aisladores tipo pin	66°C (150°F)
Aisladores tipo poste	66°C (150°F)
Aisladores tipo de suspensión	96°C (205°F)

#### 4.2.4 Resultados de la prueba

Si al realizar esta prueba un aislador falla, entonces deben someterse a la prueba otros tres objetos del lote correspondiente al aislador que falló, seleccionados al azar. Si uno o más de estos falla entonces el lote debe rechazarse ya que no cumple con los estándares.

Más información puede encontrarla en la sección 5.5 de la norma ANSI C29.1-1982

### 4.3 Comportamiento del Aislamiento bajo lluvia y Contaminación Ensayos y Normalización<sup>19</sup>

Dada la necesidad de ofrecer al sector eléctrico y a la industria, la posibilidad de efectuar ensayos para los equipos de uso a la intemperie, bajo condiciones de lluvia y/o contaminación, algunos países como Colombia, partir de 1985 han realizado estudios en el laboratorio de Alta Tensión de la U.I.S., tendientes al montaje del equipo y accesorios necesarios para la puesta en funcionamiento de estos ensayos.

Se presenta entonces una conceptualización del fenómeno, una breve descripción de las normas aplicables, el equipo y montaje utilizados, los resultados y, finalmente, las alternativas a seguir para una propuesta de normalización. Para el caso de nuestro país dadas las instalaciones y equipos de que se dispone para esta prueba, nos quedaremos únicamente con saber los procedimientos y equipos necesarios para hacer pruebas bajo tales condiciones.

#### 4.3.1 Ensayo Bajo lluvia

##### Introducción

Cuando un aislador es expuesto a la lluvia, su distancia de fuga disminuye y por lo tanto su tensión de aguante también disminuye; debido a esta consecuencia, se realizan pruebas de laboratorio exponiendo el aislador a la lluvia para poder así, determinar la tensión de aguante bajo lluvia.

Se describe a continuación el método para poder realizar la prueba bajo lluvia, y se descubre o explica cual es el efecto que la lluvia produce en el aislador en cuanto a la tensión de flameo, la cual se ve reducida por la distancia de aislamiento que se forma en comparación a un aislador seco.

#### 4.3.2 Conceptualización

El fenómeno de la lluvia es transitorio y sus consecuencias sobre el aislamiento son diferentes si se considera que el aislador está o no contaminado. Para el propósito de los ensayos bajo lluvia, la superficie del aislador debe estar libre de cualquier impureza ya sea

---

<sup>19</sup> Ver comportamiento del aislamiento bajo lluvia y contaminación ensayos y normalización Ingeniero Julio Rugeles Jones - U.I.S. Boletín no.18. ELECTROPORCELANA GAMMA S.A. Colombia. Ver referencia [2]

inerte o conductora y además libre de grasas de tipo orgánico o inorgánico. Esto de por sí, establece un desacoplamiento entre el ensayo bajo lluvia y bajo contaminación. Bajo estas condiciones, la tensión de flameo a baja frecuencia (60 Hz) se reduce apreciablemente con referencia a la obtenida con el aislador seco. Esto se debe a la reducción de la distancia de fuga por efecto del puente que ocurre al estar completamente humedecida (capa de agua conductora) la parte superior o faldón superior del aislador. Por su mismo diseño, el faldón inferior de los aisladores permanece seco, (el agua empieza a escurrir desde el borde del aislador y nunca se dirige hacia el pin). Entonces, esto quiere decir que prácticamente toda la tensión queda aplicada entre el borde del aislador y el pin. Conclusión: flameo a menor tensión por reducción de la distancia de aislamiento. Ver figura 4.1

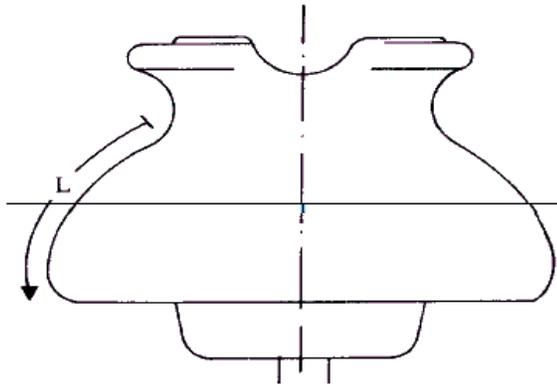


Figura 4.1. La distancia de flameo se reduce en L por puente conductivo.

El proceso descrito hasta ahora, está muy bien definido, por cuanto la tasa de crecimiento de la tensión es rápida (2 kV / seg.) para unidades motorizadas, o aplicación manual (75% de la **tensión prospectiva** de flameo rápidamente y el resto en no más de 20 seg.). Para ensayos de la **tensión soportable** el problema es más complejo por cuanto ya se habla de tensión sostenida por un minuto (IEC) o por 10 segundos (ANSI).

La razón es la siguiente: cuando se aplica el voltaje a manera de rampa hasta que ocurra flameo, el fenómeno que lo produce es el rompimiento del aislamiento en el aire (de ahí que en estas pruebas hay necesidad de efectuar correcciones por condiciones ambientales).

Cuando el voltaje se sostiene, pueden ocurrir fenómenos de predescarga sobre la superficie húmeda del aislador, teniendo como consecuencia la alteración del procedimiento antes descrito.

### 4.3.3 Instalaciones para ensayos

En la figura 4.2 se observa el esquema general de las instalaciones, cuyos accesorios aparecen detallados (con su disposición) en la figura 4.3.

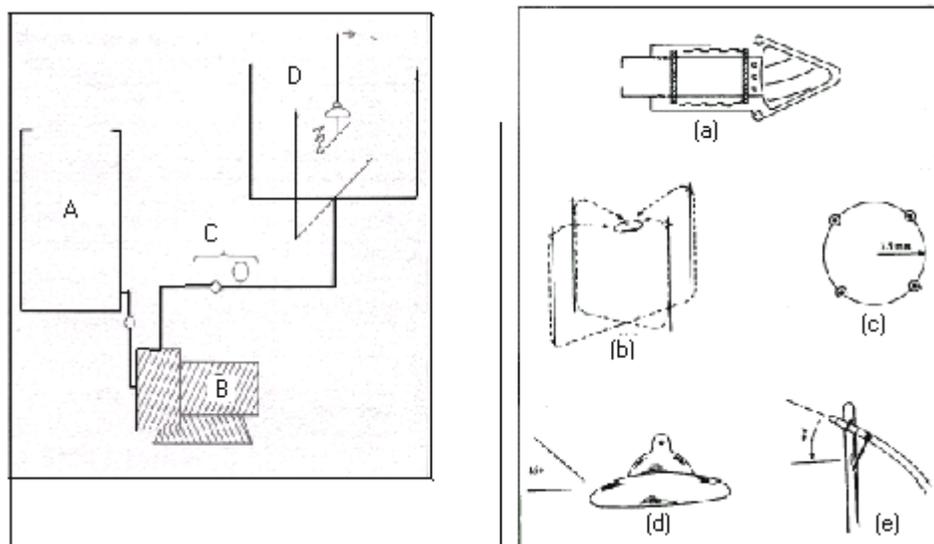


Figura 4.2. Sistema general del equipo para la generación de lluvia. Figura 4.3. Accesorios y dispositivos de los mismos.

- |   |   |
|---|---|
| A- Tanque                                     | (a) Boquillas para simular lluvia             |
| B- Motobomba                                  | (b), (c) Soportes, boquillas, separación      |
| C- Control precipitación (válvula, manómetro) | (d), (e) Caída de la lluvia y ajuste vertical |
| D- Boquillas y accesorios para simular lluvia |   |

El montaje se efectúa para llevar a cabo los ensayos de acuerdo con la norma ICONTEC vigente (numeral anterior).

El procedimiento recomendado para la ejecución del ensayo es como sigue:

- Humedecimiento del aislador.

El aislador a ensayar se rociará con agua de determinada resistividad (Ver tabla 4.2 y 4.3, figuras 4.9 y 4.10), cayendo uniformemente en forma de gotas a una precipitación específica, sobre la superficie del aislador. El rocío se realizará por medio de boquillas, que podrán ser de cualquier tipo que cumpla las condiciones de precipitación de la tabla 4.1

- Condiciones de precipitación

Estas condiciones son usadas por el método convencional estadounidense para pruebas con voltaje alterno y son adoptadas por la norma ICONTEC Tabla 4.1.

Tabla 4.1. Condiciones de precipitación para pruebas en húmedo con voltajes alternos

Características	Valores típicos
Tasa de la precipitación de la componente vertical (mm/min)	5±0.5
Límite de cualquier medida individual	5±1.25
Temperatura del agua recogida (°C)	Tamb ± 15
Resistividad del agua recogida (Wm)	178±27

Tabla 4.2. Datos correspondientes a aisladores tipo pin

Resistividad del agua a 20°C (Ωm)	Precipitación (mm./min)	Muestra No	Tensión de flameo (KV)
83.77	4.5	1	33.8±1.8
83.77	4.5	2	34.7±1
83.77	5.25	3	34.8±1.5

Tabla 4.3. Datos correspondientes a aisladores tipo suspensión

Resistividad del agua a 20°C (Ωm)	Precipitación (mm/min)	Muestra No	Tensión de flameo (KV)
80.68	4.55	1	42.9±1.8
88.68	5	2	45.1±0.3

- Medida de la precipitación

La intensidad de la lluvia puede medirse por medio de recipientes que deberán tener una abertura de 100 a 750 cm<sup>2</sup>.

Deberá medirse la componente vertical y horizontal de la lluvia, no obstante se puede medir solo la componente vertical, considerando que la lluvia cae con un ángulo de 45°.

- **Pluviómetros.**

Utilizados para la medida de la precipitación, con área de 201 cm<sup>2</sup> que están dentro del rango establecido por la norma. Adicionalmente, para la medida de la cantidad de lluvia se requieren un cronómetro y una probeta de 500 cc.

- **Conductivímetro**

Aparato utilizado para la medición de la conductividad del agua recogida en los recipientes.

- **Termómetro**

Termómetro capilar de 0°C a 100°C utilizado para medir la temperatura ambiente y la temperatura de la muestra recolectada. La norma requiere un período de humedecimiento de mínimo un minuto antes de la aplicación de la tensión. El sistema de la figura 4.2 y sus accesorios y disposiciones indicados en la figura 4.3, son diseñados para cumplir con las normas descritas anteriormente.

#### 4.3.4 Conductividad del agua

La variación en la conductividad (resistividad) del agua sí presenta una marcada influencia sobre la tensión de flameo. Esto se debe a que al aumentar la resistividad (disminuir la conductividad), la caída de tensión a través de la capa conductora (ver figura 4.1), es mayor, o sea que la parte de la tensión a través de la parte seca (faldón inferior) es menor. Conclusión: se necesita aplicar mayor tensión para obtener flameo.

#### 4.3.5 Propuesta de normalización

La norma ICONTEC vigente, aplicable a los ensayos bajo lluvia, la ANSI C29, contempla la obtención de un valor de la tensión de flameo como se explica en el numeral 3. La norma IEC 383, no contempla esta figura de ensayo y propone la ejecución de la tensión de soporte (withstand). Plantear un cambio de norma, sería cambiar de ensayo. Se propone entonces continuar aplicando la norma ICONTEC, para cuyo efecto el montaje descrito requeriría únicamente un

desmineralizador como equipo complementario para ofrecer la correspondiente homologación.

#### **4.4 Ensayo Bajo Contaminación**

##### **Introducción.**

El fenómeno de la deposición de agentes contaminantes sobre el aislamiento externo, ha sido tratado con el fin de establecer parámetros de diseño en áreas consideradas de posible riesgo o alto riesgo. Para la realización de este ensayo se necesita de la construcción de una cámara para ensayos de aislamiento bajo contaminación salina o de estrato sólido. Se plantea entonces, la descripción de las instalaciones, ensayos, resultados y las necesidades para ensamblar un laboratorio de pruebas autosuficiente para ensayos a nivel de distribución (13.2 y 23kV).

##### **4.4.1 Contaminación de estrato sólido.**

Todo aislamiento externo está sometido al efecto de agentes contaminantes (polvos, humos, cenizas, etc.). Ahora bien, la deposición de estos agentes sobre la superficie del aislador es de por sí muy heterogénea. Por ejemplo: si la deposición de las cenizas provenientes de una planta de cemento, fuera únicamente por gravedad, entonces se contaminaría exclusivamente el faldón superior. Sin embargo, la acción de los vientos y de las fuerzas de tipo electrostático, distorsiona todo el proceso y por consiguiente no se contamina homogéneamente. Un caso aparte se presenta con el crecimiento de hongos, los cuales cubren totalmente por una capa vegetal, parecida al musgo y en este caso si se obtiene un cubrimiento total. Para los ensayos de laboratorio, el contaminante recubre totalmente la superficie aislante.

##### **4.4.2 Contaminación salina**

La sal marina se deposita sobre los aisladores, por efecto de la brisa marina, la cual tiene un alto contenido de sal, especialmente donde existe oleaje fuerte, por rompimiento contra las rocas. Este tipo de contaminación es propia entonces de las regiones costeras y va disminuyendo a medida que nos alejamos del mar, hasta desaparecer completamente en el interior. En este caso, la

deposición puede ser más homogénea (neblina o rocío) y por consiguiente, los ensayos son una reproducción de estas condiciones críticas para el aislamiento.

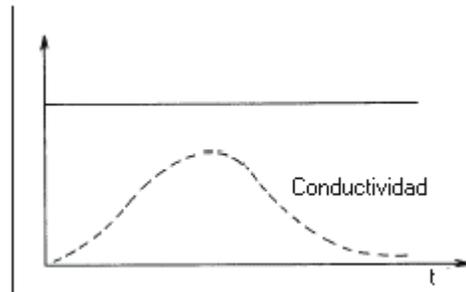


Figura 4.4. Variación de la conductividad como función del tiempo de humedecimiento. Estado sólido

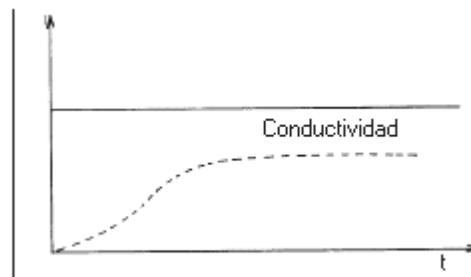


Figura 4.5. Variación de la conductividad como función del tiempo de humedecimiento. Contaminación salina.

#### 4.4.3 La conducción de corriente óhmica en el aislamiento contaminado

Para que exista conducción de corriente eléctrica de carácter óhmico es condición necesaria y suficiente que existan portadores. En el caso de la contaminación estos portadores son de tipo electrolítico y por consiguiente, necesita un agente electrolítico dentro de los componentes del contaminante. Esto condiciona el efecto a la presencia de sales y de agua.

El proceso de conducción es diferente ya sea que se trate de deposición por estrato sólido o por sal marina.

Supongamos que el aislador se contamina por estrato sólido, pero está seco. Resultado: no existe conducción, corriente = 0.

Para el caso salino, el aislador conducirá permanentemente ya que siempre estará humedecido debido a la neblina o brisa marina, entonces la corriente, dadas ciertas condiciones de tensión aplicada, permanecerá constante. Vea la figura 4.5. En presencia de niebla o rocío, el aislador se humedece y empieza a conducir hasta alcanzar un valor máximo de la corriente. Posteriormente, la parte superior del aislador empieza a lavarse y la corriente disminuye. (resistividad del agua mayor que la del electrolito, que va desapareciendo). El proceso se repite si el agente contaminante persiste. Ver figura 4.4

#### 4.4.4 Instalaciones de prueba

##### 4.4.4.1 Cámara de ensayo

Se construye una cámara con paredes de plexiglas de 1.8 m de altura y de ancho 1.2 m. Esta cámara se encuentra completamente aislada de tierra, esto es para evitar fugas de corriente hacia las paredes de la cámara durante los ensayos. Además permite la utilización de bushing de baja tensión para las conexiones eléctricas y una optimización de las distancias de aislamiento.

<sup>20</sup> Detalles de la cámara y del montaje para los ensayos descritos, se encuentran en las figuras 4.6, 4.7 y 4.8.

---

<sup>20</sup> Vea referencia [5]

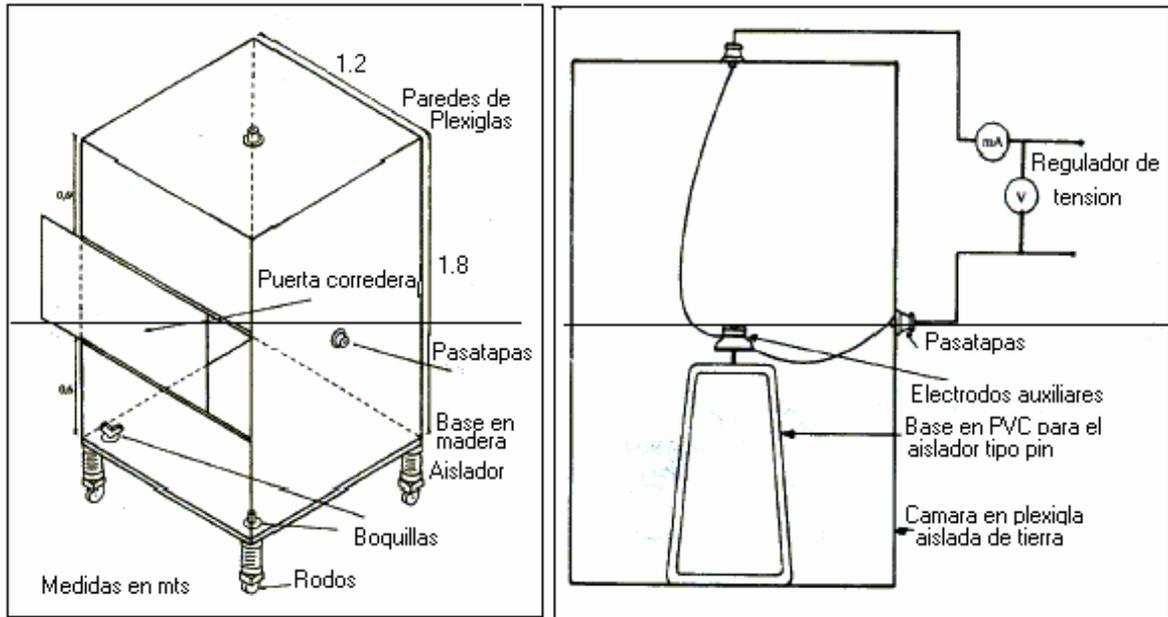


Figura 4.6. Camara de ensayos      Figura 4.7. Ensayo del aislador Pin tensión reducida

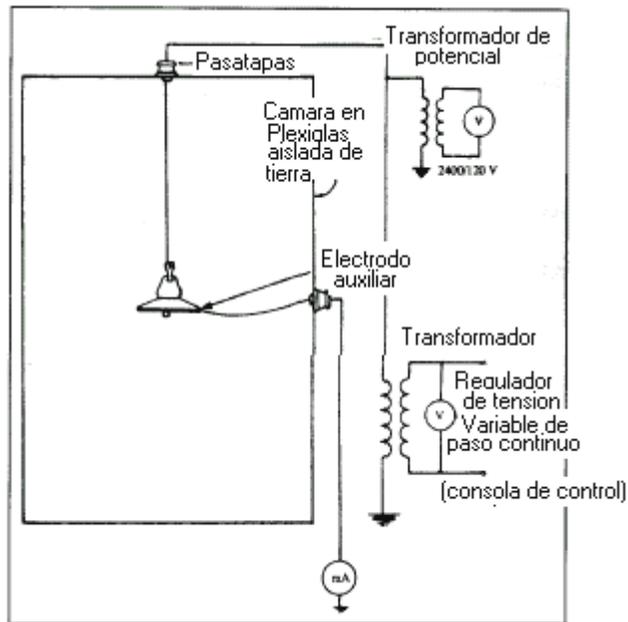


Figura 4.8. Ensayo del aislador de suspensión con alta tensión

#### 4.4.4.2 Electrodo auxiliares

Para los ensayos se usan electrodos auxiliares que consisten en una tira delgada de aluminio de ancho de 5 mm. Los electrodos en el aislador de pin se ubican en el cuello y en el borde inferior del faldón. Para el aislador de suspensión se toma como electrodo auxiliar superior el soporte metálico y el electrodo auxiliar inferior se sitúa al final del faldón. El área del aislador escogida para la ubicación de los electrodos facilita el cálculo del factor de forma y a la vez sobre esta área el contaminante se deposita de manera uniforme, siendo esta una de las condiciones de los ensayos (que exista una capa uniforme)<sup>21</sup>. Las figuras 4.9 y 4.10 indican la posición de los electrodos auxiliares.

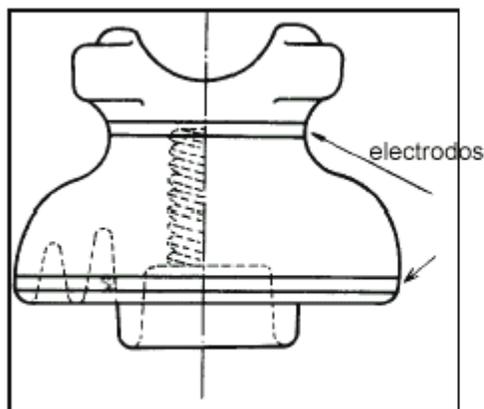


Figura 4.9. Ubicación de los electrodos auxiliares del Aislador tipo pin Clase ANSI 55-4

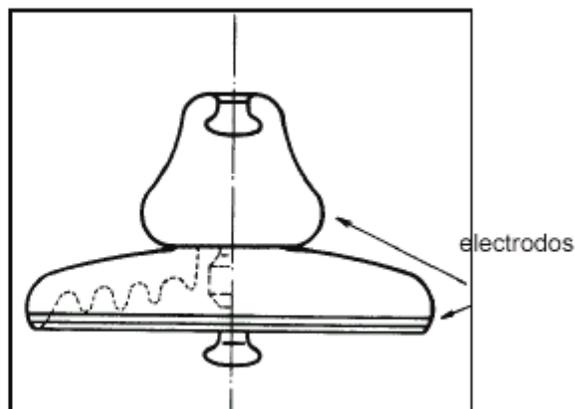


Figura 4.10. Ubicación de los electrodos auxiliares del aislador tipo suspensión clase ANSI 52-5

#### 4.4.4.3 Preparación de la mezcla contaminante

El material contaminante consiste de dos componentes separados, uno conductivo y otro inerte. La suspensión contaminante tiene la siguiente composición:

- 100 gramos de tierra diatomacea (kieselguhr).
- 10 gramos de dióxido de silicio en partículas de 2 a 20  $\mu\text{m}$ .
- 1000 gramos de agua destilada.

<sup>21</sup> Mas detalles ver Boletín 18 de ELECTROPORCELANA GAMMA S.A. Colombia

- Contenido de sal (gramos) variable.

La conductividad de esta suspensión se ajusta adicionando una apropiada cantidad de sal (cloruro de sodio), para obtener la conductividad de la capa de referencia elegida de la tabla IV (tomada de la IEEE Standard Techniques for high Voltage Testing).

Tabla 4.4. Conductividades recomendadas IEEE.

Conductividades recomendadas IEEE.	
Conductividad de la capa con referencia a 20°C±15%µS	5 10 15 40
Valores de conductividad correspondiente a la Suspension preparada. A 20°C µS/cm.	1500 3000 6000 12000

Tabla 4.5. Rangos de ESDD para diferentes grados de contaminación.

Rangos de ESDD para diferentes grados de contaminacion	
SED (mg/cm <sup>2</sup> )	Grados de contaminación
0 - 0.03	Muy ligera
0.06 - 0.1	Pesada
0.03 - 0.06	Ligera
0.1 mayores	Muy pesada

#### 4.4.4.4 Preparación de la muestra

El aislador antes del ensayo se debe limpiar cuidadosamente con agua corriente y fosfato de trisodio (Na<sub>3</sub>PO<sub>3</sub>) hasta que los trozos de grasa se remuevan completamente.

Después del secado el aislador se contamina utilizando el método de inmersión dentro de la mezcla. Posteriormente se deja nuevamente secar.

#### 4.4.4.5 Determinación de la densidad del depósito equivalente de sal, ESDD

La descarga por efecto de la contaminación en el aislador, se presenta cuando la superficie del aislador se humedece y en consecuencia la resistividad superficial disminuye, de lo anterior se puede decir que el arco eléctrico o descarga depende básicamente del tipo y cantidad de contaminante, por esta razón es necesario realizar un análisis físico químico de la contaminación, para fines de simulación en pruebas de laboratorio y para diseño y mantenimiento de los aislamientos.

La forma de realizar la medición:

Una vez contaminado el aislador, se procede a remover la capa de contaminante de un área específica del aislador, esto se hace por vertimiento de agua destilada y utilizando un cepillo de cerdas finas. Se recoge en un recipiente esta solución, se mide su conductividad, se corrige a 20°C. Conociendo los datos del área lavada, del volumen de la solución y de su conductividad, se obtiene el ESDD, de acuerdo con el procedimiento siguiente:

$$ESDD = 10 \cdot (AXD) / S \text{ (mg/cm}^2\text{)}^{22}$$

Donde:

A: Cantidad de agua destilada en centímetros cúbicos

B: Valor en gramos de sal por litro de agua de la solución

S: Área de la superficie lavada en cm<sup>2</sup>

Para obtener mejores resultados del agua destilada que se ocupe para lavar el aislador debe ser menor 5mg/cm, también se tiene que utilizar una cantidad de agua adecuada, por lo que generalmente se usa de 100 a 500 cm<sup>2</sup>.

La selección del votaje aplicado de acuerdo con las recomendaciones de la norma, no se debe aplicar una tensión mayor de 2KV por cada cm de la distancia de fuga.

Algo sobre la distancia de fuga Ver referencia [3].

#### 4.4.5 Prueba de la tensión crítica de flameo al impulso positivo y negativo

La tensión crítica de flameo de un aislador es el valor de la cresta de la onda impulso que bajo condiciones específicas causa flameo a través del medio circundante el 50% de las aplicaciones.

---

<sup>22</sup> Ver más información en Referencia [3].

#### 4.4.5.1 Condiciones

- La prueba se realiza solamente cuando el aislador está seco
- La prueba se realiza con la onda estándar de 1.2/50 $\mu$ s.
- El aislador debe estar en perfectas condiciones de operación tal como lo suministra el fabricante. Es decir debe estar completamente limpio y su estructura libre de grietas o perforaciones.

#### 4.4.5.2 Arreglo del montaje

El arreglo del montaje que debe realizarse para determinar la tensión crítica de flameo dependerá del tipo de aislador, tal como veremos a continuación:

##### 1- Aisladores tipo pin

El aislador, ya sea que tenga su pin, o haya que colocárselo debe instalarse sobre un trozo de crucero o tubo metálico recto debidamente aterrizado ubicado en forma horizontal, el cual no debe tener un largo menor de 3 pulgadas ni mayor de 6 pulgadas, es decir deberá ser de tal longitud que el flameo no se inicie en sus extremos. Este debe montarse sobre un soporte con una altura de un metro, o un poco mayor.

Pero en este caso se ha instalado un crucero suspendido en el aire el cual se aterriza directamente a tierra.

Cuando deba colocársele un pin al aislador, este debe montarse en forma vertical sobre un pin metálico de una pulgada de diámetro y de tal longitud que la distancia más corta para que se de un arco en seco desde el electrodo ubicado en la parte superior del aislador hasta alguna parte metálica conectada al crucero sea 25% mayor que la distancia entre las partes metálicas y el pin. El pin debe ser coaxial con el aislador.

Si los aisladores ya tienen instalado su pin, entonces deben instalarse directamente sobre el crucero en forma vertical.

El electrodo que sustituye al conductor que sostendrá el aislador cuando esté en operación, deberá colocarse en operación horizontal en la parte superior del aislador de tal forma que forme un ángulo recto con el pin. El electrodo debe ser una varilla de sección redonda o un tubo metálico

cor un diámetro no menor de 0.5 pulgadas y con una longitud superior a 1 metro, en el caso de las pruebas hechas actualmente se utiliza un tubo metálico de aluminio de 1 pulgada con una longitud de 3 metros. Cuando el aislador no esté dotado en su parte superior del canal para alojar el conductor o tubo de aluminio en este caso, el tubo o varilla debe colocarse en el lugar sobre el aislador destinado para sostener el conductor, El electrodo deberá sujetarse al aislador con al menos dos vueltas de alambre desnudo no menor que el No, 8 AWG, debiendo enrollarse las puntas de este en dirección hacia las puntas del electrodo.

No debe haber objetos cercanos al aislador o al electrodo. La distancia mínima permisible es de 3 pies. Un bosquejo del montaje que debe realizarse se muestra en la figura 4.11. Información adicional puede encontrarla en la norma ANSI C29.1-1988

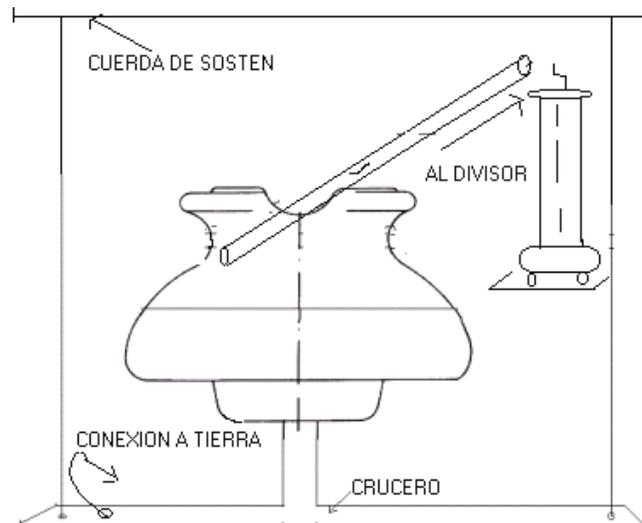


Figura 4.11. Montaje de prueba para un aislador tipo pin.

## II- Aisladores tipo poste

Para el montaje de estos se aplican las mismas condiciones descritas para el aislador tipo pin. Es decir este debe instalarse verticalmente y asegurarse sobre el trozo de cruceo de tal forma que su eje longitudinal forme un ángulo de  $90^\circ$  con el cruceo. Se aplican las mismas consideraciones de espacio que para aquellos y se consideran las mismas dimensiones para el electrodo.

### III- Aisladores de suspensión

El aislador bajo prueba (Uno solo, o cadena de aisladores), debe suspenderse verticalmente de un cable sujeto a una estructura aterrizada como la mostrada en la figura 11. La longitud del cable debe ser tal que la distancia desde el extremo más alto del aislador hasta la estructura aterrizada no debe ser menor de 3 pies. En nuestro caso en particular, esta estructura puede fijarse a los polines que sostienen el techo del laboratorio.

El electrodo que sustituye al conductor que en condiciones de operación sostendría el aislador, debe ser una varilla de sección circular o un tubo metálico, debiendo tener un diámetro exterior no menor de 1 pulgada. El electrodo debe instalarse en la parte más baja del aislador destinada para este fin, colocado en forma horizontal y formando un ángulo recto con el eje del aislador, cuidando que la distancia existente entre el borde superior del electrodo y el borde más bajo del aislador esté entre 0.5 y 0,7 veces el diámetro del disco aislante mas bajo del aislador. La longitud del electrodo no debe ser menor 1 metro. No debe haber objetos cercanos al aislador o al electrodo. La distancia mínima permisible es de 3 pies.

Un bosquejo del montaje que debe realizarse se muestra en la figura 4.12.

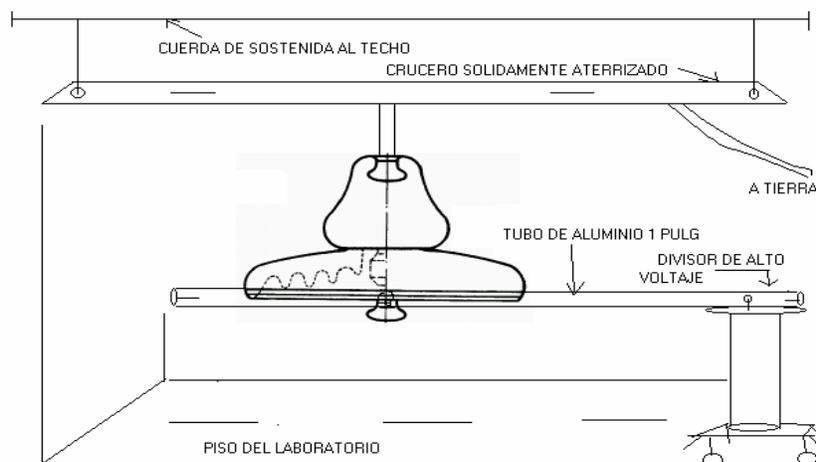


Figura 4.12. Montaje de prueba para un aislador de suspensión

#### 4.4.5.3 Procedimiento para pruebas de voltaje de aguante

La norma IEC 60-1 (1989), recomienda cuatro procedimientos para realizar pruebas de voltaje de aguante:

- 1) Tres impulsos de forma y polaridad especificada, con un nivel de voltaje de aguante, deben ser aplicados al objeto de prueba. Para que la prueba sea satisfactoria es necesario que no ocurra ninguna falla. Utilizando los métodos de detección especificados por el comité técnico. Este procedimiento es recomendado para pruebas en aislamientos no recuperables.
- 2) Quince impulsos de forma y polaridad especificados con un nivel de voltaje de aguante, son aplicados al objeto de prueba. La prueba es satisfactoria si no ocurren más de dos descargas disruptivas en la parte del aislamiento autorecuperable y además no existe indicación que el aislamiento no recuperable halla fallado, utilizando los métodos de detección especificados por el comité técnico.
- 3) Tres impulsos de forma y polaridad especificados, con una magnitud igual al voltaje de aguante, son aplicados al objeto de prueba. Si no ocurre ninguna descarga disruptiva el objeto ha pasado la prueba. Si ocurre más de una descarga disruptiva el objeto no ha pasado la prueba. Si una descarga disruptiva ocurre en la parte del aislamiento autorecuperable, nueve impulsos adicionales son aplicados, si no ocurre ninguna descarga disruptiva el objeto ha pasado la prueba. Cualquier detección de falla en la parte del aislamiento no recuperable, utilizando los métodos de detección establecidos por el comité técnico, en cualquier parte de la prueba indica que el objeto no ha pasado la prueba.
- 4) Para aislamientos autorecuperables, el voltaje en el cual se tiene una probabilidad, que ocurra una descarga disruptiva, del 10% ( $V_{10}$ ) o del 50% ( $V_{50}$ ), pueden ser evaluados utilizando métodos estadísticos.

El valor de  $V_{10}$  puede ser encontrado directamente o puede ser derivado del  $V_{50}$  utilizando la siguiente relación:

$$V_{10} = V_{50} * (1 - 1.3 * z) \quad \text{Ecu. (4.1)}$$

Donde  $z$  es la desviación convencional del voltaje de las descargas disruptivas. Para pruebas en seco y con aislamiento de aire  $z=0.03$ .

#### 4.4.5.4 Valor de la tensión crítica de flameo

El procedimiento más utilizado para determinar la tensión crítica de flameo es el que se conoce como "UP & DOWN" el cual consiste básicamente en:

- Estimar un valor para la tensión crítica de flameo ( $V_{50\%}$ ), el cual lo especifica el fabricante. Este debe corregirse a condiciones de laboratorio ya que es especificado en condiciones estándar. En caso de que no esté especificado por el fabricante entonces se aplica primero un voltaje reducido aplicando luego incrementos de 10% de este voltaje inicial hasta que se produce el primer flameo, siendo este el valor estimado de  $V_{50\%}$ .

- Estimar un valor para la desviación estándar  $\sigma$ , que se asumirá. Se ha estimado que:

$\sigma = 0.03$  para impulsos de rayo

$\sigma = 0.06$  para impulsos de maniobra

- Calcular  $\sigma$  en Kvolts :

$\sigma = 0.03 \times V_{50\%}$

$\sigma = 0,06 \times V_{50\%}$

- Aplicar un impulso al valor estimado de  $V_{50\%}$  ya corregido.

- Si no hay flameo, se incrementa el voltaje aplicado en  $\sigma$

$V' = V_v + \sigma$

- Si hay flameo, se reduce el voltaje aplicado en  $\sigma$

$V' = V_v - \sigma$

- Debe registrarse cada valor de voltaje aplicado, así como también debe indicarse si el aislador flameo (1.0) o no (0.0).

- Deben realizarse por lo menos 20 ensayos para polaridad positiva y 20 ensayos para polaridad negativa.

- Una vez que se ha completado el número de ensayos para cada polaridad, debe registrarse el número de veces que se repite cada valor de voltaje aplicado ( $N_v1$ ) y luego se procede al cálculo del valor de la tensión crítica de

flameo para cada polaridad por medio de la siguiente ecuación:

$$V50 = \frac{\sum_{i=1}^n N_{v1} \cdot V_{v1}}{\sum_{i=1}^n N_{v1}} \quad \text{Ecu. (4.2)}$$

Donde:

$V50$  = Tensión crítica de flameo

$V_{v1}$  = Diferentes valores de voltaje aplicados

$N_{v1}$  = Número de veces que se registró cada valor de  $V_{v1}$  sin considerar si flameó o no.

$n$  = Número de valores distintos de  $V_{v1}$  que se registraron.

- Debe calcularse la dispersión de los diferentes valores de voltaje aplicados con respecto al valor de la tensión crítica de flameo, es decir la desviación estándar de los datos ( $\sigma$ ). Para esto debe aplicarse la ecuación:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^m (V_{v1} - V50)^2}{m-1}} \quad \text{Ecu. (4.3)}$$

Donde:  $m = \sum_{i=1}^n N_{v1}$  Ecu. (4.4)

Para llevar el registro de los diferentes valores de voltaje aplicado es necesario formar una tabla conteniendo la información que se necesite.

#### 4.4.5.5 Correcciones

El voltaje crítico de flameo por impulso en seco que se obtiene de la prueba debe corregirse a las condiciones atmosféricas estándar (ver capítulo II):

Las pruebas de perforación se deben hacer únicamente sobre aisladores completamente ensamblados. La pieza se debe invertir y sumergir en aceite con una rigidez dieléctrica no menor de 15KV, cuando es medida con la norma americana (C 59.19-1968), que trata sobre métodos de chequeo de voltaje de disrupción en líquidos aislantes, usando electrodos de disco. Más información puede verlo en la referencia [3].

#### 4.4.5.6 Reporte de la prueba

El reporte de la prueba deberá incluir, para cada tipo de aislador a someter a prueba: en primer lugar una hoja de recepción y una hoja de devolución (entrega) del equipo a someter a prueba. Además deberá incluir una copia del oscilograma donde se ha verificado la forma de onda estándar (esta copia puede ser obtenida del osciloscopio digital del cual dispone la Escuela de Ingeniería Eléctrica), una hoja en donde se presenten las condiciones atmosféricas en el momento de realizar la prueba y valores utilizados para calcular la tensión crítica de flameo y expresarla en condiciones atmosféricas estándar. Finalmente una hoja en la que se presenten en forma resumida los valores de tensión crítica de flameo en las condiciones existentes en el momento de realizar la prueba y corregidas a condiciones atmosféricas estándar para cada una de las muestras que se someterán a la prueba.

#### I- Hoja de recepción del equipo

Tabla 4.6. La hoja de recepción de equipo

ESCUELA DE INGENIERIA ELECTRICA LABORATORIO DE ALTA TENSION HOJA DE RECEPCION DE EQUIPO	
EXPEDIENTE:	FECHA:
PROPIETARIO:	RECIBIO:
DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO:	VOLTAJE DE OPERACION:
	No DE MUESTRAS:
PRUEBAS A REALIZAR:	
OBSERVACIONES:	

## II- Hoja de devolución del equipo

Tabla 4.7 Hoja de devolución de equipo.

ESCUELA DE INGENIERA ELECTRICA LABORATORIO DE ALTA TENSION HOJA DE RECEPCION DE EQUIPO	
EXPEDIENTE:	FECHA:
PROPIETARIO:	REPORTE No:
DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO:	PROBO:
	RECIBIO:
PRUEBAS A REALIZADAS:	
OBSERVACIONES:	

También podría incluirse una hoja de resumen de realización de la prueba<sup>23</sup>.

Esta debería ser lo más descriptiva posible de las condiciones que se dieron en el momento de realizar la prueba: presión barométrica, temperatura, humedad. Debería también presentar los valores de los tiempos de frente y de cola de la onda impulso aplicada, así como los valores de los factores de corrección  $K_d$  y  $K_h$  que se aplicaron al valor de tensión crítica de flameo a fin de corregirlo a condiciones atmosféricas estándar.

Esta hoja debería encabezarse con los datos importantes del equipo probado, tales como la descripción de este. La marca, el propietario, el código que se le ha asignado a su expediente, las normas en las cuales se ha basada la prueba y el nombre de la persona que realizó las pruebas.

### 4.4.6 Prueba de tensión de resistencia al impulso

El voltaje de resistencia al impulso de un aislador es el valor de cresta de la onda impulso que bajo

<sup>23</sup> Ver referencia [4]

condiciones específicas puede aplicarse sin causar flameo o perforación.

La prueba de resistencia al voltaje impulso se realiza para probar si un aislador es capaz de soportar un especificado valor de voltaje impulso. Además puede realizarse la prueba a fin de determinar el valor de la tensión de resistencia al impulso para un dispositivo en particular.

#### **4.4.6.1 Condiciones**

- La prueba usualmente se realiza solamente con aisladores secos, aunque puede realizarse la prueba en húmedo cuando sea especificado.
- La prueba se realiza con la onda estándar de 1.2/50 $\mu$ s
- El aislador a someterse a prueba debe estar en perfectas condiciones de operación, tal como es suministrado por el fabricante, debiendo estar completamente limpio su estructura libre de grietas o perforaciones.

#### **4.4.6.2 Arreglo del montaje**

Para la realización de la prueba de resistencia al voltaje impulso se aplica el mismo tipo de montaje que se utiliza en la realización de la prueba de tensión crítica de flameo, el cual se describió ó en la sección 4.4.5.

#### **4.4.6.3 Correcciones**

El voltaje de resistencia obtenido de la prueba debe corregirse a condiciones atmosféricas estándar según el procedimiento que se presentó en el capítulo II

#### **4.4.6.4 Realización de la prueba**

La prueba debe realizarse con una onda impulso estándar que produzca el voltaje más bajo de flameo de los dos que se especifican para el aislador bajo prueba. El voltaje especificado está dado para condiciones atmosféricas estándar, por lo que debe corregirse a las condiciones existentes en el momento de realizar la prueba por el procedimiento descrito en el capítulo II. La

publicación IEC 60 especifica para la realización de la prueba de tensión de resistencia al impulso la aplicación de 5 impulsos con el valor de tensión especificado. Si no se produce ningún flameo, entonces los requerimientos de la prueba quedan satisfechos. Si se produce un flameo, deben aplicarse diez impulsos adicionales y el dispositivo pasará la prueba solamente si no se produce ningún flameo durante la aplicación de los últimos diez impulsos.

El arreglo de las estructuras puede verlo en las figuras 4.11 y 4.12

#### 4.4.6.5 Determinación de la tensión de resistencia

En algunos casos la prueba no se realiza para comprobar el valor de tensión de resistencia al impulso especificado por el fabricante, si no para determinar el valor de esta para un prototipo de aislador en particular, por ejemplo durante la prueba de nuevos modelos de aisladores. Para determinar el valor de la tensión de resistencia al impulso debe seguirse el procedimiento siguiente: aplicar un voltaje reducido, luego incrementar el voltaje en pasos de 10% y continuar hasta que ocurre el primer flameo a un voltaje  $v_f$ . Se escogen luego pasos de incremento/decremento de voltaje en un rango de 1% a 4%, de  $V_f(d)$ , Luego se reduce  $V_f$  y en un valor  $d$  y a este nivel de voltaje se aplican impulsos hasta que ocurra un flameo, o hasta que se hayan aplicado veinte impulsos sin que ocurra flameo. El voltaje se reduce luego en un factor  $d$  y se repite el proceso anterior. El valor de tensión de resistencia al impulso es aquel que se obtiene cuando se aplican veinte impulsos sin producir flameo y adicionalmente no ocurre flameo a voltajes más bajos. Tres o cuatro niveles de voltaje sin causar flameo serán suficientes.

La tensión más baja de flameo se determina a partir de la tensión que produzca flameo ( $v_f$ ), incrementando luego el voltaje en pasos de 1 a 4% de  $V_f$  hasta encontrar el voltaje al cual se produce flameo durante veinte aplicaciones y se produce flameo para cada impulso de mayor voltaje.

#### 4.4.6.6 Reporte de la prueba<sup>24</sup>

El reporte de la prueba debe incluir la hoja de recepción y la hoja de entrega del equipo, las cuales se describieron en la sección 4.4.5.6. Finalmente debería incluirse una en la que se presente el número de muestras

---

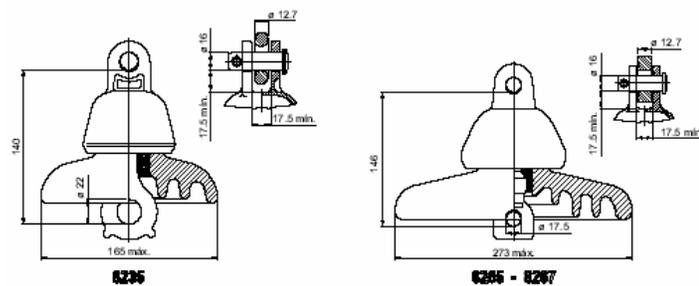
<sup>[24]</sup> Ver Referencia [4]

que se han sometido a prueba y el voltaje de resistencia al impulso especificado (VRS), así como el voltaje aplicado durante la prueba (VRF), para cada una de las muestras. Un ejemplo de esta hoja de reporte puede consultarse la referencia [4].

#### 4.4.6.7 Características Electricas de los Aisladores

Estas se muestran en las siguientes tablas.

Tabla 4.8. Aisladores de suspension tipo clevis  
ANSIC29.2 - 1992



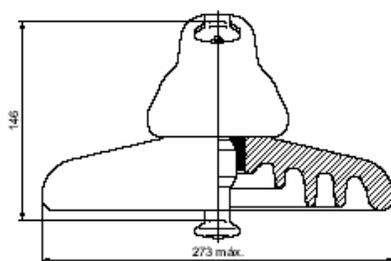
NÚMERO DE CATÁLOGO	8235	8265	8267
CLASE ANSI (C29.2 - 1992)	52 - 1	52 - 4	52 - 4
<b>DISTANCIAS CRÍTICAS, mm</b>			
Distancia de arco	114	197	197
Distancia de fuga	178	292	292
<b>VALORES MECÁNICOS</b>			
Resistencia electromecánica, kN	44	67	89
Resistencia al impacto, Nm	5	6	10
Prueba de carga de rutina, kN	22	33.5	44.5
Prueba de carga sostenida, kN	27	44	60
<b>VALORES ELÉCTRICOS, kV</b>			
Flameo de baja frecuencia en seco	60	80	80
Flameo de baja frecuencia en húmedo	30	50	50
Flameo crítico al impulso positivo	100	125	125
Flameo crítico al impulso negativo	100	130	130
Voltaje de perforación a baja frecuencia	80	110	110
<b>RADIO INFLUENCIA</b>			
Voltaje de prueba RMS a tierra, kV	7.5	10	10
RIV máximo a 1000 kHz, $\mu$ V	50	50	50
<b>DATOS DE EMPAQUE</b>			
Peso neto por unidad, kg	2.3	5.2	5.4
Peso bruto por caja, kg	25	38.2	40
Número de piezas por caja	8	6	6

Nota 1. Esmalte café o esmalte gris ANSI 70

Nota 2. Los aisladores pueden solicitarse con doble capa de galvanizado en campana y perno para zonas contaminadas.

Nota 3. Para las referencias 8265 y 8267, los aisladores pueden solicitarse con manguito de zinc en el perno para zonas contaminadas.

Tabla 4.9. Aisladores de suspension tipo cuenca y bola



**8255 - 8256 - 8257 - 8258**

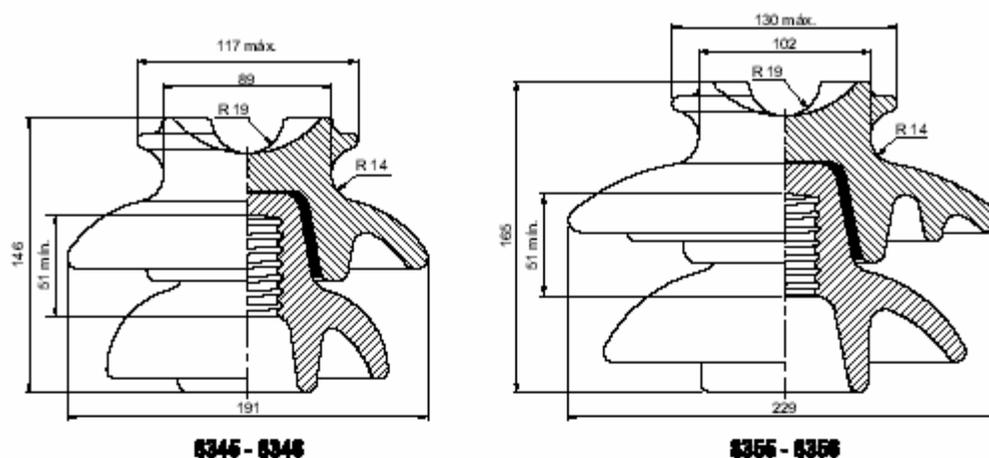
NÚMERO DE CATÁLOGO	8255	8256	8257	8258
<b>CLASE ANSI (C29.2 - 1992)</b>	52 - 3	52 - 3	52 - 3	52 - 5
<b>DISTANCIAS CRÍTICAS, mm</b>				
Distancia de arco	197	197	197	197
Distancia de fuga	292	292	292	292
<b>VALORES MECÁNICOS</b>				
Resistencia electromecánica, kN	67	80	89	111
Resistencia al impacto, Nm	6	6	10	10
Prueba de carga de rutina, kN	33.5	40	44.5	55.5
Prueba de carga sostenida, kN	44	53.5	60	67
<b>VALORES ELÉCTRICOS, kV</b>				
Flameo de baja frecuencia en seco	80	80	80	80
Flameo de baja frecuencia en húmedo	50	50	50	50
Flameo crítico al impulso positivo	125	125	125	125
Flameo crítico al impulso negativo	130	130	130	130
Voltaje de perforación a baja frecuencia	110	110	110	110
<b>RADIO INFLUENCIA</b>				
Voltaje de prueba RMS a tierra, kV	10	10	10	10
RIV máximo a 1000 kHz, $\mu$ V	50	50	50	50
<b>DATOS DE EMPAQUE</b>				
Peso neto por unidad, kg	5.3	5.3	5.4	5.4
Peso bruto por caja, kg	38	38	40	40
Número de piezas por caja	6	6	6	6

Nota 1. Esmalte café o esmalte gris ANSI 70

Nota 2. Los aisladores pueden solicitarse con doble capa de galvanizado en campana y perno para zonas contaminadas.

Nota 3. Los aisladores pueden solicitarse con manguto de zinc en el perno para zonas contaminadas.

Tabla 4.10. Aisladores tipo pin doble  
ANSI C29.5 -1984 Y ANSI C29.6 - 1984

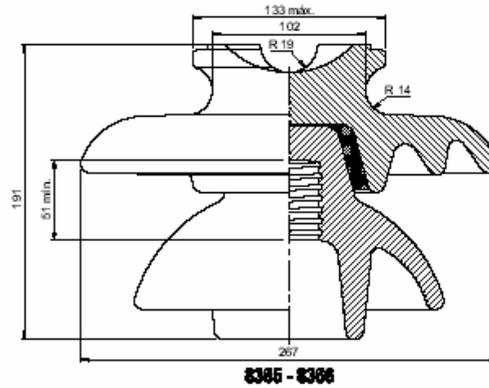


NÚMERO DE CATÁLOGO	8345	8346	8355	8356
CLASE ANSI (C29.6 - 1996)	56 - 1	56 - 1	56 - 2	56 - 2
<b>DISTANCIAS CRÍTICAS, mm</b>				
Distancia de arco	178	178	210	210
Distancia de fuga	330	330	432	432
Altura mínima del espigo	152	152	178	178
<b>VALORES MECÁNICOS</b>				
Resistencia al cantilever, kN	11.1	11.1	13.4	13.4
<b>VALORES ELÉCTRICOS, kV</b>				
Voltaje típico de aplicación	23	23	23	23
Flameo de baja frecuencia en seco	95	95	110	110
Flameo de baja frecuencia en húmedo	60	60	70	70
Flameo crítico al impulso positivo	150	150	175	175
Flameo crítico al impulso negativo	190	190	225	225
Voltaje de perforación a baja frecuencia	130	130	145	145
<b>RADIO INFLUENCIA</b>				
Esmalte RF	No	Si	No	Si
Voltaje de prueba RMS a tierra, kV	15	15	22	22
RV máximo a 1000 kHz, $\mu\text{V}$	8000	100	12000	100
<b>DATOS DE EMPAQUE</b>				
Peso neto por unidad, kg	2.98	2.98	4.6	4.6
Peso bruto por caja, kg	22.9	22.9	24	24
Número de piezas por caja	6	6	4	4

Nota 1. Rosca tipo estándar  $\text{Ø}35$  mm, según ANSI C29.6 - 1996

Nota 2. Esmalte café o esmalte gris ANSI 70

Tabla 4.11. Aisladores tipo pin doble



NÚMERO DE CATÁLOGO	8365	8366
<b>CLASE ANSI (C29.6 – 1996)</b>	56 – 3	56 – 3
<b>DISTANCIAS CRÍTICAS, mm</b>		
Distancia de arco	241	241
Distancia de fuga	533	533
Altura mínima del espigo	203	203
<b>VALORES MECÁNICOS</b>		
Resistencia al canfilever, kN	13.4	13.4
<b>VALORES ELÉCTRICOS, kV</b>		
Voltaje típico de aplicación	34.5	34.5
Flameo de baja frecuencia en seco	125	125
Flameo de baja frecuencia en húmedo	80	80
Flameo crítico al impulso positivo	200	200
Flameo crítico al impulso negativo	265	265
Voltaje de perforación a baja frecuencia	165	165
<b>RADIO INFLUENCIA</b>		
Esmalte RF	No	Si
Voltaje de prueba RMS a tierra, kV	30	30
RIV máximo a 1000 kHz, $\mu$ V	16000	200
<b>DATOS DE EMPAQUE</b>		
Peso neto por unidad, kg	6.8	6.8
Peso bruto por caja, kg	32.8	32.8
Número de piezas por caja	4	4

Nota 1. Rosca tipo estándar Ø35mm, según ANSI C29.6 – 1996

Nota 2. Esmalte café o esmalte gris ANSI 70

#### 4.4.7 Pruebas preliminares y resultados.

Para realizar las pruebas preliminares de la señal de voltaje del disparo del generador se conecto a la salida del Divisor Capacitivo una punta atenuadora de 100:1 y a la salida de esta se instalo una protección de gas y en serie se instalo además un protector primario de sobretensión y a la salida de este se instalo un tester o voltímetro digital pero al realizar el disparo no se podía observar un nivel de voltaje, para asegurarnos que el voltaje de salida no dañara el osciloscopio digital que se instalaría posteriormente, después de varias pruebas se observo que la protección de gas se estaba disparando, por lo cual no se observo la señal de voltaje que el equipo estaba mandando.

Estas protecciones si estaban funcionando, pero no para los propósitos que se esperaban en estas pruebas. Estas protecciones se muestran en la siguiente figura.



Figura 4.13 Conexión del voltímetro de prueba



Figura 4.14 Protector primario      Figura 4.15 Protección a gas de sobretensiones

Se procedió a desacoplar estas protecciones de la punta atenuadora y se realizo otra prueba, y se obtuvo la señal voltaje de lo cual se concluyo que el osciloscopio no se dañaría por lo que se sustituyo el tester por el osciloscopio digital obteniéndose la onda estándar esperada.



Figura 4.16 Conexión del osciloscopio portátil



Figura 4.17 Forma de onda estándar del impulso de rayo en el osciloscopio

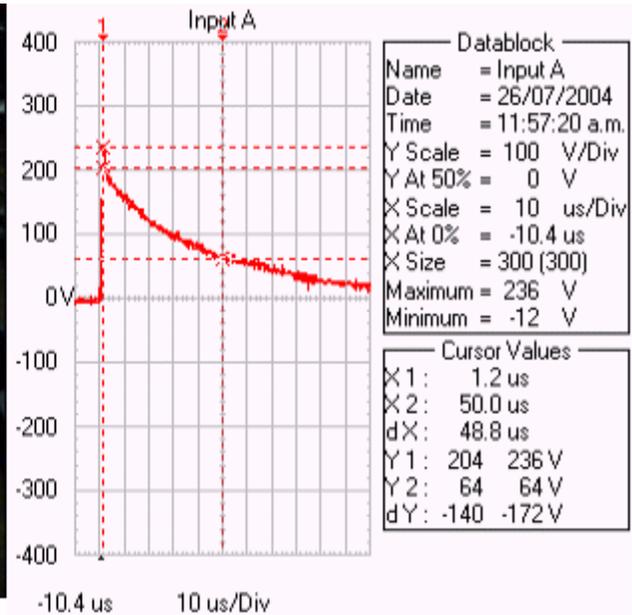


Figura 4.18 Forma de onda estándar del impulso de rayo utilizando el software del osciloscopio.

#### 4.4.7.1 Pruebas de medición de corriente de retorno a tierra.

Con las pruebas anteriores solventadas se trato de medir la corriente de retorno a tierra en varias posiciones para lo cual se instalo el siguiente equipo como se muestran en las siguientes figuras.



Figura 4.19 Probador de corriente AC flexible 2000 (fluke i2000flex)

En el extremo del convertidor de corriente a voltaje se instalo un tester digital para probar que el rango de corriente que se esta midiendo no sea tan elevado se comprobó que las lecturas se podían medir ya que no se daño el tester, luego de esta prueba se sustituyo el tester por el osciloscopio y se obtuvieron los siguientes resultados.

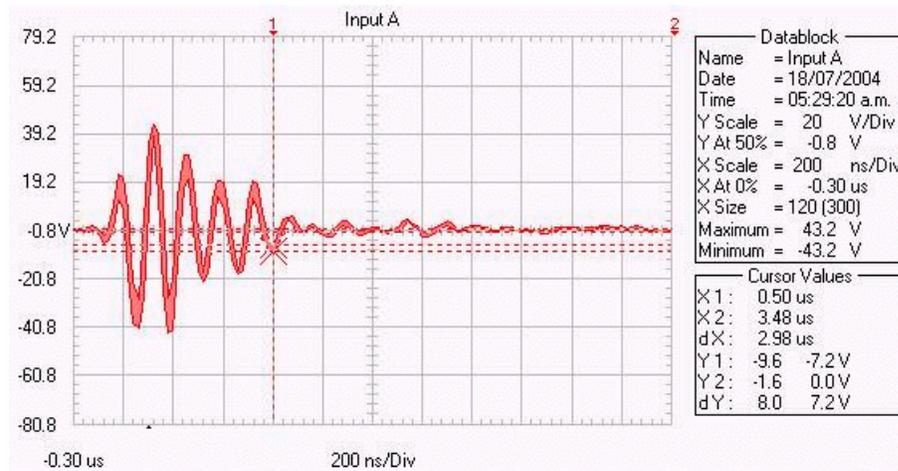


Figura 4.20 Forma de onda de corriente para 10 Kv de carga.

El resultado obtenido no es un valor real ya que la magnitud obtenida es muy elevada ya que al hacer la transformación del probador de corriente flexible de 1mv por amperio se obtiene 43,200 Amperios y la magnitud real es menor.

Para tratar de mejorar esta medición se modifico el probador de corriente flexible separando el aro de medición, y la parte de instrumentación colocándola en la oficina de el equipo de medición como se muestra en las siguientes figuras



Figura 4.21 Solo el aro de medición



Figura 4.22 La parte de instrumentación electrónica.

El resultado que se obtuvo con esta modificación se muestra en la siguiente figura.

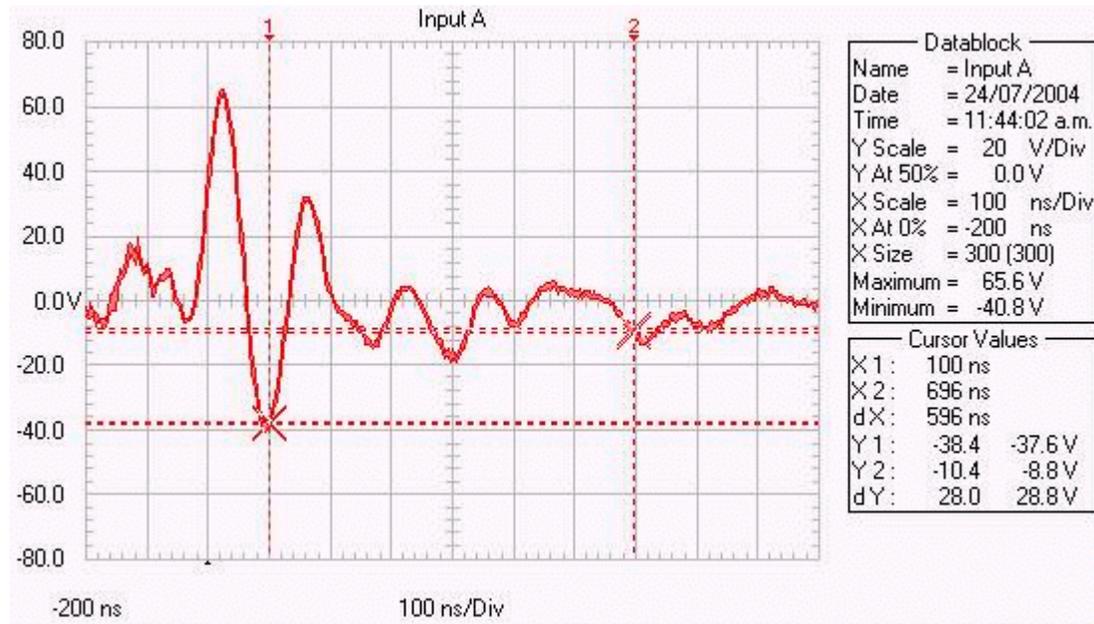


Figura 4.23 Forma de onda de corriente para 10 Kv de carga.

El resultado obtenido no es un valor real ya que la magnitud obtenida es muy elevada ya que al hacer la transformación del probador de corriente flexible de 1mv por amperio se obtiene 65,600 Amperios y la magnitud real es menor.

Por lo que se puede concluir que la modificación realizada no presenta una mejoría aceptable en el resultado como se puede observar en la figura anterior.

Para poder realizar la medición de corriente de retorno de tierra se necesita un equipo adecuado para estos niveles de voltaje y campo magnético con el que se realizaron las pruebas no es adecuado debido que mide hasta 2000 amperios y es muy susceptible al ruido.

#### 4.4.7.2 Pruebas de medición de corriente de impulso.

Las pruebas de corriente de impulso no se realizaron porque en el laboratorio no se cuenta con las derivaciones blindadas para la medición de dicha corriente (Resistencia Shunts).

#### 4.4.7.3 Las derivaciones blindadas para medir corrientes de impulso

Las derivaciones blindadas tienen una construcción tubular, y su elemento resistivo es una cincha de Ni-Cr que le garantiza prácticamente los valores óhmicos para variaciones o cambios de temperatura, las cuales se muestran en las figuras 4.23 y 4.24

Debido a los requisitos de la construcción, los valores óhmicos inferiores son obtenidos arreglando en paralelo varias cinchas, en una configuración de derivaciones de jaula de la ardilla.

Los valores óhmicos más altos (más alto que o iguales para 1 ohm) son obtenidos bobinando dos cinchas en direcciones relevantes, ambas cinchas tendiéndose en el mismo plano.

Esto permite respuesta extrapequeña mida el tiempo fuera de derivaciones excesivamente largas.

En la tabla 4.12 se presentan las características técnicas y físicas.

Para evitar la influencia de disturbios, la medida es comunicada el osciloscopio a través de un cable coaxial.

Para mayor información de especificaciones técnicas ver referencia [10] IEEE STD 4a-2001 apartado 13.5 Measurement of impulse currents

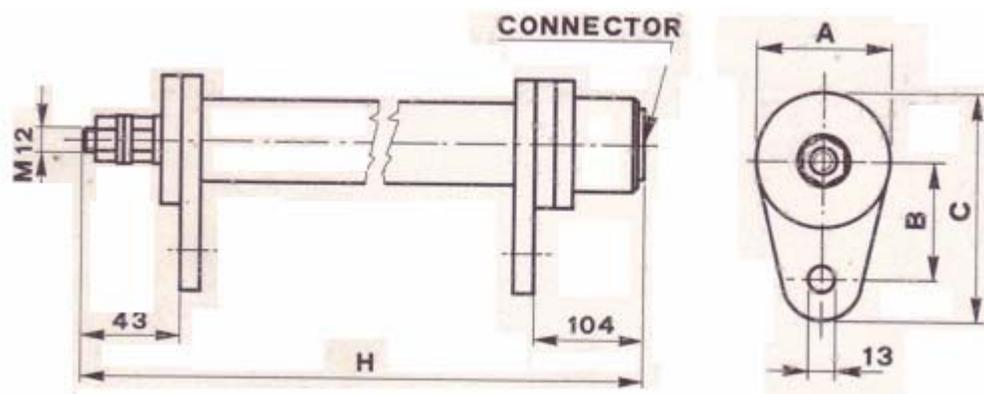


Figura 4.24 Derivaciones blindadas para medir corrientes de impulso

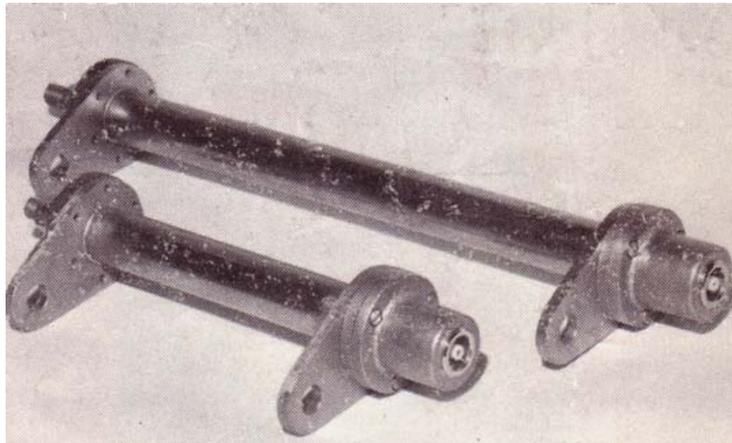


Figura 4.25 Derivaciones blindadas para medir corrientes de impulso

Tabla 4.12 Características técnicas y físicas de las derivaciones blindadas para medir corrientes de impulso

Tipo	Resistencia	Corriente Pico Máx. KA KA	Disipación de Energía KJ KJ	H mm	A mm	B mm	C mm
ISS 001	0.01	250	3	340	130	90	170
ISS 002	0.02	100	4	490	130	90	170
ISS 005	0.05	50	2	390	75	65	117.5
ISS 01	0.1	25	2	390	55	50	92.5
ISS 05	0.5	5	2	390	55	50	92.5
ISS 1	1	2.5	4	390	55	50	92.5
ISS 2	2	1.25	2	390	55	50	92.5
ISS 5	5	0.5	2	340	55	50	92.5
ISS 10	10	0.25	1	340	55	50	92.5
ISS 20	20	0.12	2	340	55	50	92.5

#### 4.4.8 Pruebas para determinar la forma de onda estándar y voltaje del generador de alto voltaje

El objetivo de estas pruebas era determinar si el generador de impulso se encontraba en perfectas condiciones eléctricas, es decir si producía la forma de onda estándar para la cual fue diseñado.

Para obtener estas señales se fijaron en el banco de mando voltajes de carga para 15 Kv, 20 Kv, 25 Kv, 30 Kv, 35 Kv, 40 Kv, 45 Kv y 50 Kv, obteniéndose las señales como se muestran en las siguientes figuras.

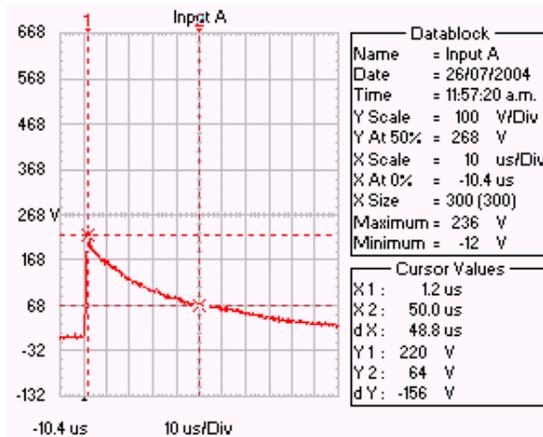


Figura 4.26 Forma de onda Estándar para 15 Kv de carga  
 $V_o = 236/4.24E-3$   
 $V_o = 55,660.37 \text{ V}$   
 Tiempo de frente =  $1.34\mu\text{s}$

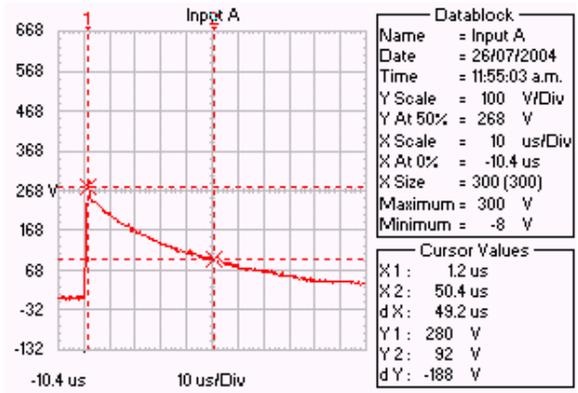


Figura 4.27 Forma de onda estándar para 20 Kv carga  
 $V_o = 300/4.24E-3$   
 $V_o = 70,754.71 \text{ V}$   
 Tiempo de frente =  $1.34\mu\text{s}$

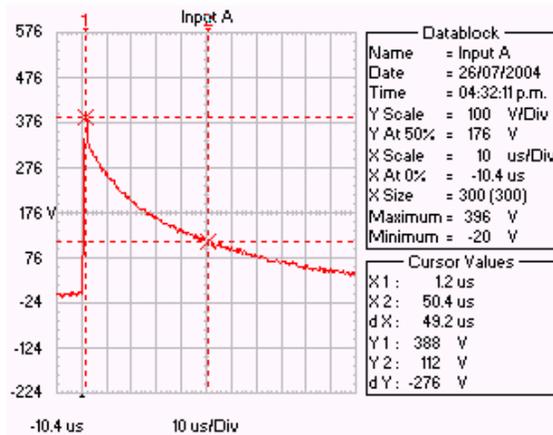


Figura 4.28 Forma de onda estándar para 25 Kv  
 $V_o = 396/4.24E-3$   
 $V_o = 93,396.22 \text{ V}$   
 Tiempo de frente =  $1\mu\text{s}$

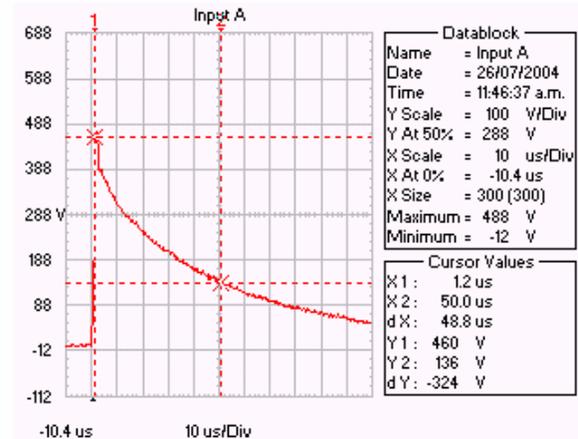


Figura 4.29 Forma de onda estándar para 30 Kv  
 $V_o = 488/4.24E-3$   
 $V_o = 115,094.33 \text{ V}$   
 Tiempo de frente =  $1\mu\text{s}$

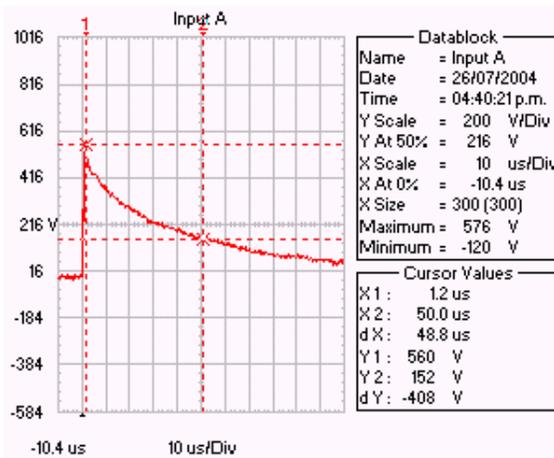


Figura 4.30 Forma de onda estandar para 35 Kv  
 $V_o = 576/4.24E-3$   
 $V_o = 135,849.05 \text{ V}$   
 Tiempo de frente =  $1.17\mu\text{s}$

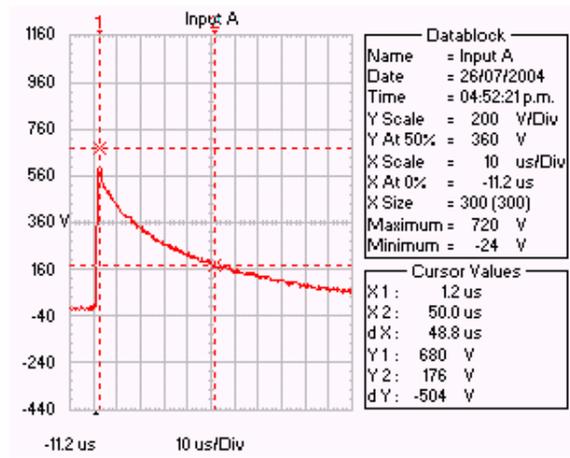


Figura 4.31 Forma de onda estandar para 40 Kv  
 $V_o = 720/4.24E-3$   
 $V_o = 169,811.32 \text{ V}$   
 Tiempo de frente =  $1.34\mu\text{s}$

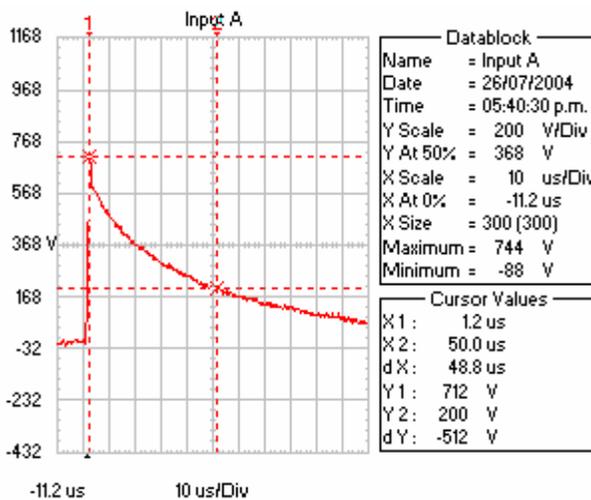


Figura 4.32 Forma de onda estandar para 45 Kv  
 $V_o = 744/4.24E-3$   
 $V_o = 175,471.69 \text{ V}$   
 Tiempo de frente =  $1.34\mu\text{s}$

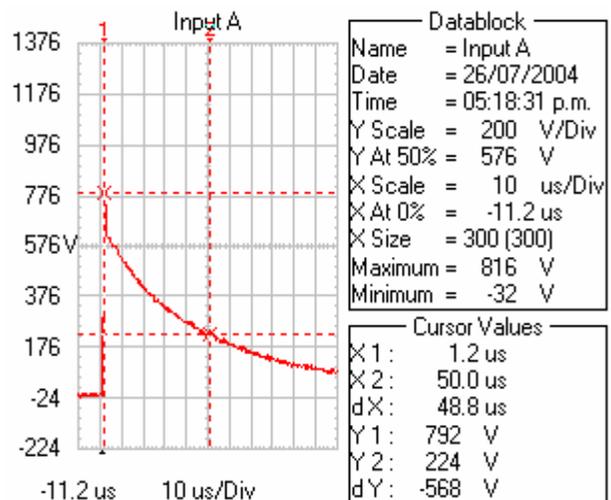


Figura 4.33 Forma de onda estandar para 50 Kv  
 $V_o = 816/4.24E-3$   
 $V_o = 192,452.83 \text{ V}$   
 Tiempo de frente =  $1.5 \mu\text{s}$

Todos estos voltajes son valores sin aplicarles corrección de condiciones atmosféricas. Cuando se realizaron estas pruebas se pudo observar que si el osciloscopio se dejaba conectado a la red esto ocasionaba interferencia en la señal introduciéndole ruido, por lo que

se realizaron las mediciones con el osciloscopio en modo de batería para mayor exactitud de la señal.

#### 4.4.8.1 Condiciones atmosféricas estándar

Consule el capítulo II

#### 4.4.8.2 Condiciones atmosféricas en el instante de la prueba

Las condiciones son:

Humedad 42 %

Presión 711 mmHg

Temperatura 26 °C

Utilizando la fórmula y las gráficas del capítulo II se obtiene:

$$K_d = \left[ \frac{P}{P_o} \right]^m X \left[ \frac{273+to}{273+t} \right]^n \text{ de Norma IEEE Std 4a-2001} \quad \text{Ecu. (4.5)}$$

$$Kh = (K)^w \text{ Tomada de la misma norma} \quad \text{Ecu. (4.6)}$$

$$Fc = \frac{K_d}{K_h} \text{ Factor de corrección. Ver Capítulo II} \quad \text{Ecu. (4.7)}$$

Los exponentes m,n,w dependen del tipo de polaridad del voltaje y de la distancia de chispeo o de flameo. Consultar tabla 1.3 y figura 1.4 de la misma norma. Para este caso se consideran igual a 1.

Entrar con el dato de temperatura a la figura 1.3 de la misma norma y se obtiene la humedad absoluta.

Humedad absoluta 22 g / m<sup>3</sup>

m = n = w = 1

K = 0.92

K<sub>d</sub> = 0.98

K<sub>h</sub> = 0.92

$$Fc = \frac{K_d}{K_h} = \frac{0.98}{0.92} = 1.065 \quad \text{Factor de corrección}$$

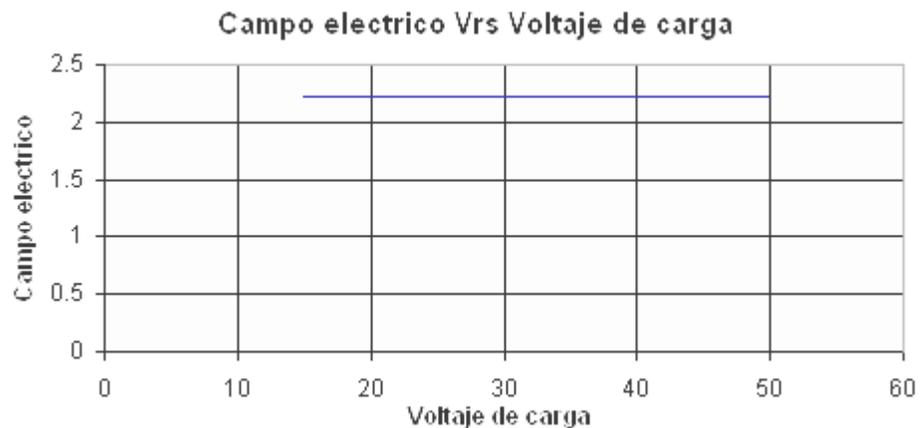
A continuación se presenta la tabla 4.13 la cual contiene un resumen de las pruebas preliminares. Poner el osciloscopio en una escala de 100:1, dado que esta es la especificación

de la punta de protección que se conecta a su entrada. Utilizar una escala de 100 Volt/div desde 10 a 40 KV y una escala de 200Volt/div de 40 a 70KV, esto con el objetivo de tener una visualización aceptable. Utilizar también una escala de 10:s por división.

Tabla 4.13 Pruebas preliminares de voltaje de salida sin corregir y aplicando corrección.

Voltaje de carga	Distancia de los explosores	Distancia del espinterometro	Voltaje En Osciloscopio	Voltaje de salida	Voltaje de salida corregido
KV	Mm	Mm	Volt.	Volt.	Volt.
15	6	28	236	55,660.37	59,278.30
20	9	36	300	70,754.71	75,353.77
25	10.5	45	396	93,396.22	99,466.98
30	13.5	53	488	115,094.33	122,575.47
35	15	63	576	135,849.05	144,679.24
40	18	73	720	169,811.32	180,849.05
45	20.5	83	744	175,471.69	186,877.35
50	22.5	93	816	192,452.83	204,962.26

Puede también comprar los datos de voltaje de salida con las simulaciones hechas en ATP del generador de impulsos. Capitulo V.



De la tabla anterior, de las columnas 1 y 2 se puede graficar la variación del campo electrico con respecto al voltaje de carga. Notando que este es el mismo independientemente con que voltaje se cargue el generador.

#### 4.4.9 Pruebas específicas

##### 4.4.9.1 Prueba para el aislador tipo pin

Especificaciones:

Aislador clase ANSI 56-1. Según Norma C29.6-1996  
Flameo crítico al impulso positivo 150KV

Marca ICB

Las condiciones atmosféricas standard ver sección 4.0.8.1

Condiciones atmosféricas en el instante de la prueba:

Humedad 60 %

Presión 947 Hp = 711 mmHg

Temperatura 30 °C

Utilizando las ecuaciones de la sección 4.0.8.2 se obtienen los siguientes datos

$$K_d = 0.9047$$

$$K_h = 0.89$$

$$\text{Factor de corrección} = F_c = \frac{K_d}{K_h} = \frac{0.9047}{0.89} = 1.016 \quad \text{Ecu (4.11)}$$

$$\text{Voltaje corregido} = \frac{CFO}{F_c} = \frac{150}{1.016} = 147.64 \text{ V} \quad \text{Ecu (4.12)}$$

$$V_{\text{carga}} = \frac{147.64 \text{ Kv}}{4} = 36.91 \approx 37 \text{ Kv} \quad \text{Ecu (4.13)}$$

Aplicando el 10% tenemos aproximadamente 4KV.

Se inicia la aplicación de voltaje de carga desde 37 KV  $\pm$  4 KV, si flamea se disminuye en 4KV y si no flamea se aumenta en 4KV.

Tabla 4.14 voltajes de prueba aplicados y tipo de descarga obtenida.

Voltaje Aplicado KV	38	34	38	37	33	36	32	35	31	34	32	35	31
Flameo	1		1	1		1		1		1		1	
No flameo		0			0		0		0		0		0
Voltaje Aplicado KV	34	31	33	34	37	33	30	33	36	32	35	31	
Flameo	1				1				1		1		
No flameo		0	0	0		0	0	0		0		0	

Tabla 4.15 voltajes aplicados vrs numero de veces que se repiten

Voltaje Aplicado	Numero de veces que se repiten
30	1
31	4
32	3
33	4
34	4
35	3
36	2
37	2
38	2

Para encontrar el voltaje critico de flameo (CFO) se aplica la siguiente ecuación.

$$V_{50} = \frac{\sum_{i=1}^n N_{v1} \cdot V_{v1}}{\sum_{i=1}^n N_{v1}} \quad \text{Ecu (4.14)}$$

$$V_{50} = \frac{[(30 * 1) + (31 * 4) + (32 * 3) + (33 * 4) + (34 * 4) + (35 * 3) + (36 * 2) + (37 * 2) + (38 * 2)]}{25}$$

$$V_{50} = 33.8 \approx 34KV$$

$V_{50} = 34 * 4 = 136$  KV es el CFO Probado

BIL = CFO (1-KΦ) Con K = 1.3 (Recomendado por la IEC)

Ecu (4.15)

$$\Phi = 0.03$$

$$BIL = 0.961 * CFO$$

$$BIL = 0.961 * 136 = 131 \text{ KV BIL de la prueba}$$

De los datos del fabricante se tiene:

$$\text{El CFO} = 150 \text{ KV}$$

El CFO corregido a condiciones de prueba es:

CFO corregido =  $150 / 1.016 = 147.63 \text{ KV}$  por lo tanto el BIL corregido es:

$$BIL_{\text{corregido}} = 147.63 * 0.961 = 141.87 \text{ KV}$$

$$BIL_{\text{sin corregir}} = 150 * 0.961 = 144.15 \text{ KV}$$

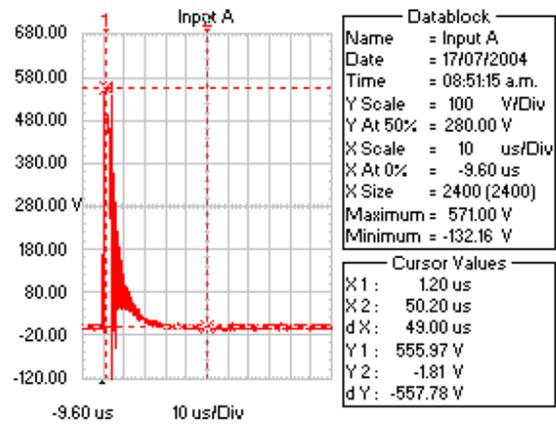
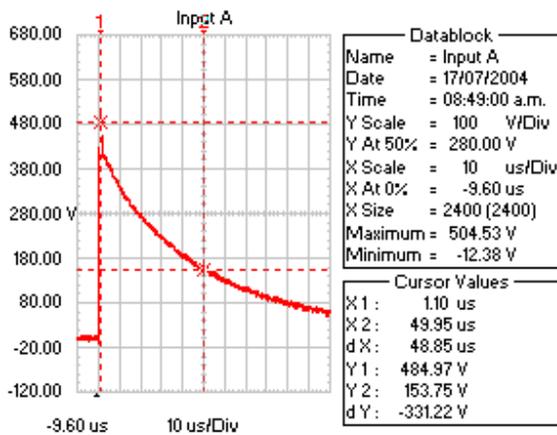


Figura 4.34 forma de onda obtenida para 34 KV sin flamear  
Vo = 118.99 KV.

Figura 4.35 forma de onda obtenida para 37 KV con flameo  
Vo = 134.67 KV

Aceptación o rechazo del elemento

$$BIL_{\text{nominal}} = 144.15 \text{ kV}$$

$$BIL_{\text{obtenido}} = 131 \text{ kV}$$

La prueba del objeto es satisfactoria si el BIL encontrado es mayor o igual que el valor de impulso de voltaje de aguante especificado por el fabricante. En nuestro caso el elemento debe ser rechazado.

## 4.5 Prueba para el aislador tipo Suspension

### 4.5.1 Prueba para un solo aislador

Especificaciones:

Aislador clase ANSI 52-4. Según Norma C29.2-1992  
Flameo critico al impulso positivo 125KV

Marca CST

Las condiciones atmosféricas ver seccion 4.1.6.1

Condiciones atmosféricas en el instante de la prueba

Humedad 55 %

Presión 711 mmHg

Temperatura 31 °C

$$K_d = 0.9016$$

$$K_h = 0.89$$

$$F_c = \frac{K_d}{K_h} = \frac{0.9016}{0.89} = 1.013$$

$$\text{Voltaje corregido} = \frac{CFO}{F_c} = \frac{125}{1.013} = 123.39KV$$

$$V_{\text{carga}} = \frac{123.39KV}{4} = 30.84 \approx 31KV$$

Aplicando el 10% tenemos aproximadamente 3KV.

Se inicia la aplicación de voltaje de carga desde 31KV±3KV.

Tabla 4.16 voltajes de prueba aplicados y tipo de descarga obtenida.

Voltaje Aplicado KV	30	29	28	29	27	28	29	30	29	28	29	30	29
Flameo	1	1		1			1	1	1			1	
No flameo			0		0	0				0	0		0
Voltaje Aplicado KV	30	29	30										
Flameo	1		1										
No flameo		0											

Tabla 4.17 voltajes aplicados vrs numero de veces que se repiten

Voltaje Aplicado	Numero de veces que se repiten
27	1
28	3
29	7
30	5

$$V_{50} = \frac{\sum_{i=1}^n Nv_i \cdot Vv_i}{\sum_{i=1}^n Nv_i}$$

$$V_{50} = \frac{[(27 * 1) + (28 * 3) + (29 * 7) + (30 * 5)]}{16}$$

$$V_{50} = 29KV$$

$$V_{50} = 29 * 4 = 116 KV \text{ es el CFO Probado}$$

$$BIL = CFO (1 - K\Phi) \text{ Con } K = 1.3 \text{ (Recomendado por la IEC)} \quad \text{Ecu (4.15)}$$

$$\Phi = 0.03$$

$$BIL = 0.961 * CFO$$

$$BIL = 0.961 * 116 = 111.47 KV \text{ BIL de la prueba}$$

De los datos del fabricante se tiene:

El CFO = 125 KV

El CFO corregido a condiciones de prueba es:

CFO corregido =  $125/1.013 = 123.39$  KV por lo tanto el BIL corregido es:

BILcorregido =  $123.39 * 0.961 = 118.58$  KV

BIL sin corregir =  $125 * 0.961 = 120.12$  KV

BIL<sub>nominal</sub> = 118.58kV

BIL<sub>obtenido</sub> = 111.47kV

La prueba del objeto es satisfactoria si el BIL econtrado es mayor o igual que el valor de impulso de voltaje de aguante especificado por el fabricante. En nuestro caso el elemento debe ser rechazado.

#### 4.5.2 Prueba para una cadena de dos aisladores

Especificaciones:

Aislador clase ANSI 52-3. Según Norma C29.2-1992

Flameo critico al impulso positivo 220KV

Marca LAPP

Las condiciones atmosféricas ver seccion 4.1.6.1

Condiciones atmosféricas en el instante de la prueba

Humedad 46 %

Presión 711 mmHg

Temperatura 28.9 °C

$K_d = 0.9079$

$K_h = 0.89$

$$Fc = \frac{K_d}{K_h} = \frac{0.9079}{0.89} = 1.02$$

Para obtener los datos técnicos para una cadena una de aisladores se cuenta con las tablas de la ANSI C29.1. Ver Anexo

El dato de flameo critico al impulso positivo también puede ser obtenido de la norma IEC 71 dado por la siguiente formula:

$$CFO = 530 * S(0.74 + 0.26 * Kg)$$

$$\text{Ecu. (4.16)}$$

S: Es la distancia entre el electro de alto voltaje y la parte baja del aislador de suspensión en milímetros (130mm), mas dos veces la distancia que hay entre la parte baja del aislador a su extremo superior (292mm). Es el doble porque es una cadena de dos aisladores.

$$Kg = 1.35$$

Sustituyendo:

$$CFO = 530 * (133 + 292) * (0.74 + 0.26 * 1.35) = 245,747 \text{ Volt.}$$

$$\text{Voltaje corregido} = \frac{CFO}{Fc} = \frac{245,747}{1.02} = 240.93 \text{ KV}$$

$$V_{\text{carga}} = \frac{240.93 \text{ Kv}}{4} = 60.2 \text{ Kv}$$

Aplicando el 10% tenemos aproximadamente 6KV.

Se inicia la aplicación de voltaje de carga desde 60KV±6KV.

Tabla 4.18 voltajes de prueba aplicados y tipo de descarga obtenida.

Voltaje Aplicado KV	60	58	59	60	56	58	59	61	60	58	54	56	58
Flameo	1			1					1	1			
No flameo		0	0		0	0	0	0			0	0	0
Voltaje Aplicado KV	61	59	56	58	60	59	61						
Flameo	1				1		1						
No flameo		0	0	0		0							

Tabla 4.19 voltajes aplicados vrs numero de veces que se repiten

Voltaje Aplicado	Numero de veces que se repiten
54	1
56	3
58	5
59	4
60	4
61	3

$$V_{50} = \frac{\sum_{i=1}^n N_{v1} \cdot V_{v1}}{\sum_{i=1}^n N_{v1}}$$

$$V_{50} = \frac{[(54 * 1) + (56 * 3) + (58 * 5) + (59 * 4) + (60 * 4) + (61 * 3)]}{20}$$

$$V_{50} = 58.5 \approx 59KV$$

$V_{50} = 59 * 4 = 236$  KV es el CFO Probado

BIL = CFO (1-KΦ) Con K = 1.3 (Recomendado por la IEC)  
Ecu (4.15)

$$\Phi = 0.03$$

$$BIL = 0.961 * CFO$$

$$BIL = 0.961 * 236 = 226.67$$
 KV BIL de la prueba

De los datos obtenidos utilizando la formula y no las tablas del fabricante:

$$\text{El CFO} = 245,747 \text{ V}$$

El CFO corregido a condiciones de prueba es:

$$\text{CFO corregido} = 245,747 / 1.02 = 240,928V \text{ por lo tanto el BIL corregido es:}$$

$$\text{BIL corregido} = 240,928 * 0.961 = 231,582 \text{ KV}$$

$$BIL_{\text{nominal}} = 231.58kV$$

$$BIL_{\text{obtenido}} = 226.67kV$$

La prueba del objeto es satisfactoria si el BIL econtrado es mayor o igual que el valor de impulso de voltaje de aguante especificado por el fabricante. En nuestro caso el elemento debe ser rechazado.

## 4.6 La prueba de impulso en transformadores.

### 4.6.1 Generalidades

Como se ha mencionado anteriormente, las pruebas dieléctricas tienen por objeto general verificar las cualidades de diseño, correcta fabricación y calidad de los materiales que constituyen los aislamientos de aparatos e instalaciones para redes eléctricas. La prueba impulso forma parte de estas pruebas dieléctricas. Ver referencia [6].

El aislamiento de los transformadores de alta y mediana tensión esta formado por una estructura compleja de materiales aislantes de los mas diversos tipos, el cual se encuentra sometido a diferentes requerimientos dieléctricos y de otra clase (esfuerzos mecánicos, corrosión química, gradientes térmicos, etc.). Estos requerimientos pueden provocar deterioros o fallas del aislamiento debido a diseño inadecuado.

Los esfuerzos dieléctricos que normalmente debe sufrir en servicio son de dos clases:

- a) Esfuerzos dielectricos ordinarios. Son fundamentalmente a la tensión alterna (por ejemplo 50 a 60Hz), que se supone ha de estar prácticamente presente durante la vida útil del transformador, pero sin exceder un valor limite de diseño que es la tensión máxima de servicio.
- b) Esfuerzos excepcionales. Son aquellos, que si bien aparecen solo esporádicamente y tienen una duración sumamente corta, corresponden a tensiones alternas o no, cuya magnitud excede el valor de la máxima tensión de servicio, por esta razón se les suele llamar sobre tensiones. Los tipos de sobre tensiones ya fueron explicadas en capítulos anteriores.

Los esfuerzos que soportan los aislamientos de los bobinados de un transformador suelen ser clasificados en dos categorías:

- a) Sobre tensiones transversales. Estas provocan una diferencia de potencial elevada de un bobinado con respecto a otro o con respecto a las estructuras metálicas puestas a tierra.
- b) Sobre tensiones longitudinales. Se manifiestan por una diferencia de potencial elevada entre dos puntos de un mismo arrollamiento, situados mas o menos cercanos entre si (por ejemplo espiras consecutivas).

La prueba o ensayo impulso reproduce lo que son las sobre tensiones antes mencionadas. Por otra parte la prueba impulso no debe ser tomada como definitiva en el sentido de que sea la única exigencia para que el aislamiento de un transformador sea apto. Aunque se trata sin duda de de una de las pruebas dieléctricas mas importantes, la información que de ella se obtiene no es suficiente para asegurar el buen funcionamiento de un aislamiento en servicio, en todo caso una prueba impulso fallida será prueba irrefutable de que el transformador ensayado no responde a las exigencias impuestas. Ver referencias [6] y [7].

La experiencia demuestra que si un transformador ha pasado satisfactoriamente el ensayo, su comportamiento es al menos tan bueno como el de los otros del mismo diseño que no han sido ensayados. Ver referencia [9].

#### **4.6.2 Aplicaciones de la prueba impulso**

##### **4.6.2.1 La prueba impulso como control de calidad del diseño.**

El constructor deberá elaborar el diseño del aislamiento de un transformador de modo que obtenga las características requeridas con la mayor economía posible de materiales y conservando un adecuado margen de seguridad. Usando técnicas tradicionales de diseño es posible predecir, para un diseño dado, el impulso soportable con una precisión del 15% aproximadamente. En esta etapa de diseño el ensayo de impulso puede ser un valioso auxiliar para el fabricante, permitiendo comprobar sobre prototipos o modelos si los cálculos efectuados con correctos e introducir eventualmente las correcciones que hicieran falta. Ver referencias [8].

##### **4.6.2.2 La prueba impulso como control de calidad de fabricación**

La prueba impulso puede ser utilizada por el fabricante como un control de calidad de fabricación ya que por su gran sensibilidad pone al descubierto los mas pequeños defectos del aislamiento.

Cuando el diseño del transformador ha sido convenientemente verificado, puede ser no necesaria la prueba.

#### 4.6.2.3 La prueba impulso como ensayo de recepción o aceptación de tipo

Al efectuar la prueba impulso a un transformador, esto genera confianza en el comprador pues este queda convencido de que el transformador cumple con las especificaciones requeridas, en este caso en lo que respecta al aislamiento frente a sobre tensiones de tipo atmosférico.

Bastara que se efectuara un ensayo únicamente en un transformador seleccionado de un mismo lote.

#### 4.6.2.4 La prueba impulso como ensayo de aceptación de rutina

Aunque lo usual es considerar la prueba impulso como de tipo, puede quedar convenido entre el fabricante y el comprador que se le aplique como ensayo de rutina. En tal caso cada transformador será individualmente probado.

### 4.7 Clase de aislamiento en transformadores

#### 4.7.1 Terminales de línea

A los terminales de línea de un devanado se les asigna un nivel básico de aislamiento (BIL) y una clase de aislamiento para indicar a los encargados de las pruebas dieléctricas lo que estos terminales son capaces de resistir.

Los niveles de aislamiento al impulso y las clases de aislamiento son mostradas en la figuras 15 para aparatos inmersos en aceite y en la figura 16 para aparatos tipo seco.

Los transformadores diseñados para conexión Y solamente con el neutro disponible a través de un bushing se les asigna una clase de aislamiento para ambas terminales de línea y neutro.

Información adicional relativa a pruebas dieléctricas para transformadores de distribución se muestran en las tablas 7.6 y 7.8 de la referencia [4] y para transformadores de potencia en las tablas 7.7 y 7.8 de la misma referencia. Para voltajes nominales de sistemas trifásicos (línea a línea) ver también las tablas 7.3, 7.6, 7.7 de la referencia [4].

#### 4.7.2 Terminal de neutro

El terminal de neutro de un devanado el cual es diseñado para conexión Y solamente, puede tener un aislamiento menor que el del terminal de línea, como se indica a continuación

Para transformadores diseñados solamente para la conexión Y con el neutro disponible y:

- Aterrizados solidamente, directamente o a través de un transformador de corriente tendrá una clase de aislamiento en el neutro no menor que el especificado en la columna 2 de la Tabla 4.14.
- Conectados a tierra a través del devanado serie de un transformador regulador y una impedancia neutra separada, tendrá una clase de aislamiento en el neutro no menor que la de la columna 3 de la Tabla 4.14.
- Conectados a tierra a través de un neutralizador de falla a tierra o con el neutro disponible y aislado, tendrá una clase de aislamiento no menor que el que se especifica en la columna 4 de la 4.14.

#### 4.7.3 Bushing de transformadores.

Los bushing de transformadores deben ser capaces de soportar las pruebas impulso y pruebas de bajo voltaje requeridas para la clase de aislamiento especificada, tal como se muestra en la Tabla 4.15.

#### 4.8 Metodología de la prueba impulso en transformadores

La onda de la prueba impulso en transformadores, así como el equipo eléctrico en general, es la onda standard 1.2/50 $\mu$ s ya descrita. Se recomienda ondas de polaridad negativa para transformadores inmersos en aceite y la polaridad positiva para transformadores tipo seco.

Si al probar aparatos inmersos en aceite, las condiciones atmosféricas en el momento de la prueba son tales que las boquillas (bushing) no resistan la onda de la polaridad especificada, entonces se puede usar para este terminal en particular, una onda de polaridad opuesta.

Cuando se especifiquen pruebas impulso en los terminales de línea, estas serán y deberán aplicarse en el siguiente orden:

- 1- Una onda completa reducida
- 2- Dos ondas cortadas
- 3- Una onda completa plena

Cuando se especifiquen también pruebas de frente de onda, las pruebas impulso generalmente deben aplicarse en el siguiente orden:

- 1- Una onda completa reducida
- 2- Dos frentes de onda
- 3- Dos onda recortadas
- 4- Una onda completa plena

#### **4.8.1 Prueba de onda completa reducida (reduce fullwave)**

Para esta prueba la onda de voltaje aplicada debe tener un valor de cresta entre 50% y el 70% del valor de la onda plena mostrada en las tablas 4 y 5 de la referencia 7, mostradas en las Tablas 4.12 y 4.13.

#### **4.8.2 Prueba de onda cortada (chopped wave)**

Para esta prueba la onda de voltaje aplicada será recortada por medio de un explosor adecuado. Y debe instalarse tan cerca como sea posible a los terminales del transformador. La onda debe tener un valor de cresta y un tiempo para el flameo en acorde con las Tablas 4.12 y 4.13.

#### **4.8.3 Prueba de frente de onda (front of wave)**

Para efectuar esta prueba, el voltaje se debe recortar en la parte ascendente de la onda antes de que alcance el valor de cresta, por medios convenientes. Debe tener un valor de cresta y un tiempo de arqueado de acuerdo con la Tabla 4.14.

La prueba de frente de onda no se requiere en devanados de bajo voltaje que no están expuestos a rayos y que están conectados directamente al equipo del usuario los cuales tengan baja resistencia al impulso.

Para medir la tensión debe usarse una conexión separada del terminal bajo prueba, el explosor que se utilice para cortar la onda en el frente se debe conectar directamente a dicho terminal. En general las pruebas de frente de onda se deben aplicar solamente a terminales de línea y no al neutro o a otros terminales.

Con el fin de obtener alguna tolerancia durante la realización de las pruebas, se permite una diferencia de aproximadamente  $-0.1$  a  $0.3\mu\text{s}$  a los tiempos tabulados en la Tabla 4.14. Si al efectuar la prueba de frente de onda, no se cumple con la tolerancia de  $-0.1\mu\text{s}$  se debe considerar que la prueba es valida siempre y cuando la tensión de cresta obtenida en la prueba haya igualado o excedido la tensión determinada por la siguiente formula:

$$\text{Tensión} = \text{Tensión de cresta} \left[ 1 + \frac{(T-0.1)-T_1}{AT_1} \right], \text{ en donde:}$$

Tensión de cresta: Valor especificado para el arqueo en microsegundos

T: tiempo especificado para el arqueo en microsegundos

$T_1$ : tiempo efectivo medido en microsegundos

A: 4 para clase de aislamiento mayor o igual a 69KV

3 para clase de aislamiento menor o igual a 46KV

Cuando se prueban devanados que tengan una gran capacitancia, como por ejemplo devanados de alta capacidad en KVA y tensión nominal baja, puede ser no practico obtener tiempos para arqueos menores de  $0.5\mu\text{s}$ , ya que las grandes corrientes producidas al corte de la onda de tensión asociadas con la gran capacitancia, introducen errores en el circuito de medición. Con el fin de evitar estas dificultades se debe considerar que se alcanzan tiempos especificados de prueba siempre y cuando las pruebas se realicen con las distancias del explosor dadas en la figura 19. Los tiempos para arqueo máximo y mínimo deben ser de  $1\mu\text{s}$  y  $0.5\mu\text{s}$  respectivamente.

#### 4.8.4 Prueba de onda completa (Full wave)

Para esta onda de voltaje debe tener un valor de cresta de acuerdo a la Tabla 4.12 y 4.13. Se debe tener cuidado de que ningún arqueo ocurra en los bushing.

Para evitar arqueos de los bushing durante condiciones de humedad y de densidad de aire, la distancia de arqueo de los mismos debe aumentarse por cualquier medio conveniente.

#### 4.8.5 Terminales que no están siendo probados

Los terminales de línea, incluyendo aquellos de autotransformadores y transformadores reguladores tienen que ser solidamente aterrizados o también aterrizados a través de un resistor con un valor ohmico que no exceda los presentados en la Tabla 4.17.

Los siguientes factores se consideran en la selección del aterrizamiento para cada terminal:

El voltaje a tierra en cualquier terminal que no esta siendo probado no debería de exceder del 80% del nivel de voltaje del impulso de onda completa para ese terminal.

- 1- Si un terminal tiene que ser conectado a un cable de conexión de baja impedancia en servicio, entonces ese terminal será solidamente aterrizado o también aterrizado a través de una resistencia con un valor ohmico que no exceda la impedancia del cables.

Tabla 4.12 Clase de aislamiento para transformadores inmersos en aceite

Clase de aislamiento (KV) Columna 1	Prueba de Baja frecuencia (KV rms) Columna 2	BIL y Onda completa (KV cresta) Columna 3	Ondas recortadas	
			(KV de cresta) Columna 4	Tiempo mínimo para el flameo (us) Columna 5
1.2A	10	30	36	1
1.2	10	45	54	1.5
2.5A	15	45	54	1.5
2.5	15	60	69	1.5
5.0A	19	60	69	1.5
5	19	75	88	1.6
8.7A	26	75	88	1.6
8.7	26	95	110	1.8
15A	34	95	110	1.8
15	34	110	130	2
18	40	125	145	2.25
25	50	150	175	3
35	70	200	230	3
46	95	250	290	3
60	120	300	345	3
69	140	350	400	3
92	185	450	520	3
115	230	550	630	3
138	275	650	750	3
161	325	750	865	3
180	360	825	950	3
196	395	900	1035	3
215	430	975	1120	3
230	460	1050	1210	3
260	520	1175	1350	3
287	575	1300	1500	3
315	630	1425	1640	3
345	690	1550	1780	3
375	750	1675	1925	3
400	800	1800	2070	3
430	860	1925	2220	3
460	920	2050	2360	3
490	980	2175	2500	3
520	1040	2300	2650	3
545	1090	2425	2800	3

La letra "A" bajo la clase de aislamiento se refiere a específicamente a niveles de distribución para transformadores de distribución.

Tabla 4.13. Clase de aislamiento para transformadores tipo Seco

Voltaje nominal Del sistema (V) Columna 1	Nivel Básico de Aislamiento al impulso BIL (KV) Columna 2	Clase de aislamiento Columna 3	Pruebas de baja frecuencia (KV rms) Columna 4	Ondas Impulso		
				Ondas recortadas		Onda plena
				(KV) Cresta Columna 5	Tiempo para el flameo (us) Columna 6	KV de Cresta Columna 7
1.2	10	1.2	4	10	1	10
2.4	20	2.5	10	20	1	20
4.8	25	5	12	25	1	25
8.32	35	8.7	19	35	1	35
14.4	50	15	31	50	1.25	50

Notas:

- c) Los voltajes entre 120-600 voltios inclusive, poseen una clase de aislamiento de 1.2KV. Los voltajes nominales entre sistemas nominales de voltajes diferentes se asocian a la clase de aislamiento próxima mayor, a menos que se especifique de otra manera. La clase de aislamiento de devanados conectables en estrella o delta es determinada por la conexión estrella.
- d) Para devanados conectados en estrella para operación con el neutro sólidamente aterrizado o a través de una impedancia, el neutro puede tener un aislamiento reducido.

Tabla 4.14. Clase de aislamiento mínimas en el neutro

Clase de aislamiento en los terminales de línea de los bobinados (KV) Columna 1	Clase de aislamiento mínima en el neutro (KV)		
	Aterrizado solidamente a a través de Transformador de corriente Columna 2	aterrizado a través de Transformador regulante Columna 3	aterrizado a través de neutralizador de falla a tierra o aislado pero protegido contra impulso Columna 4
1.2	1.2	1.2	1.2
2.5	2.5	2.5	2.5
5	5	5	5
8.7	8.7	8.7	8.7
15	8.7	8.7	8.7
25	8.8	8.7	15
34.5	8.7	8.7	25
46	15	15	34.5
69	15	15	46

Columna 1: Para clases de aislamiento de terminales de línea mayores, la clase de aislamiento del neutro debe especificarse según los requerimientos del servicio, pero en ningún caso debe ser menor que 15KV

Columna 2: Para transformadores de 500KV y menores. Debe hacerse un estudio para el aterrizaje.

Tabla 4.15. Características eléctricas de los bushing de los transformadores

Clase de Aislamiento (KV) *	Distancia De (Min. Pdas)	BUSHING AL EXTERIOR						BUSHING AL INTERIOR **	
		Transf. de Potencia +			Transf. de Distribución +			(60Hz) resistencia	Onda completa de impulso (1.2/50us) resistencia
		60Hz resistencia		Onda completa de impulso 1.2/50us	60Hz Resistencia		Onda completa de impulso 1.2/50us		
		1min. seco (KV)	10seg húmedo (KV)	resistencia en seco (KV)	1min. seco (KV)	10seg húmedo (KV)	resistencia en seco (KV)		
1.2	-	-	20	-	10	6	30	-	-
2.5	-	21	24	60	15	13	45	20	45
5	-	27	-	75	21	20	60	24	60
8.7	-	-	30	-	27	24	75	30	75
8.7	7	35	-	95	-	-	-	-	-
15	10	-	-	-	35	30	95	50Y	110Y
18	15	-	-	-	42	36	125	-	-
25	-	-	-	-	-	-	-	60	150
34.5	-	-	-	-	-	-	-	80	200

\*Los valores de las clases de aislamiento dados arriba son números de referencia y no implican necesariamente una relación al voltaje especificado de operación.

+ Transformadores de potencia indica transformadores con capacidad mayor de 500KVA y transformadores de distribución indica transformadores de 500KVA y menores

\*\* Bushing al interior son aquellos que se utilizan en transformadores para uso interior. Los valores para pruebas de bushing al interior no se aplican en bushing utilizados para protección mecánica de conductores aislados.

Y Transformadores para interior pequeños pueden suministrarse con bushing para una prueba en seco de 38KV y una prueba impulso de 95KV.

Tabla 4.16. Valores de prueba, ajustes de espacio, y tiempo Mínimos y máximos de flameo.

Valores de prueba De Onda completa + (KV)	Valores de prueba De Frente de onda (KV)	Tiempo de flameo		
		Longitud del espacio ++ (pulgadas)	mínimo $\mu$ s	Máximo $\mu$ s
45	75	1 1/4	0.5	1
60	100	1 1/2	0.5	1
75	125	2	0.5	1
95	165	2 3/4	0.5	1
110	195	3 3/8	0.5	1
150	260	4 1/2	0.5	1

+ Onda completa de voltaje de 1.2/50 $\mu$ s

++ El espacio consistirá de las distancias entre dos barras de sección Cuadrada de 1/2 pulgada cuadrada. Una de las dos barras se deberá montar en el terminal que tiene que ser probado y la otra a partes aterrizadas adyacentes.

Tabla 4.17 Resistores de aterrizamiento especificados para terminales de transformadores no sometidos a la prueba.

VOLTAJE NOMINAL DEL SISTEMA (KV)	RESISTENCIA (Ohms)
345 y menor	500
500	400
700	300

#### 4.9 Pruebas impulso en el neutro de los transformadores

La prueba impulso en el neutro de un transformador ó un regulador separado conectado en el neutro de un transformador se aplica por uno de los métodos siguientes:

##### 4.9.1 Método 1. Prueba del neutro induciendo la tensión a través de un terminal de línea

La prueba en el neutro, o en el neutro y el devanado regulador, se induce por medio de la aplicación de un impulso a cualquier terminal de línea con el neutro en

circuito abierto ó aterrizado a través de una impedancia de manera que el voltaje requerido de onda completa se obtenga del terminal neutro a tierra. Se aplica una onda reducida y dos ondas completas plenas al terminal de línea con un voltaje de cresta igual ó menor que el nivel de onda plena del terminal de línea. Los otros devanados pueden ser cortocircuitados para esta prueba. El devanado que esta siendo probado deberá estar ó en la conexión de mínimo voltaje ó de máximo voltaje. Los oscilogramas de voltaje se tomarán en el neutro.

Cuando se utilice este método, la prueba en el neutro precederá la prueba en el terminal de línea.

#### **4.9.2 Método 2. Prueba del neutro por aplicación directa**

Para éste método se aplica directamente al neutro ó al devanado regulador, una onda reducida y dos ondas plenas con una amplitud igual al nivel de aislamiento del neutro (ver Tabla 4.14). El devanado que está siendo probado estará en la conexión de voltaje mínimo ó en la de voltaje máximo. Se usará una onda que tenga un frente no mayor de  $10\mu\text{s}$  y una cola de no más de  $50\mu\text{s}$  a la mitad de la cresta, excepto que si la inductancia del devanado es demasiado baja que la magnitud de voltaje deseado y la duración del punto de 50% en la cola de la onda no se pueda obtener, se puede utilizar una cola de onda más corta.

#### **4.10 Practicas de aterrizamiento**

Se debe prestar atención especial a las conexiones de puesta a tierra cuando se trate con circuitos impulso debido a la considerable magnitud y a las rápidas variaciones de forma de onda de las corrientes que están en juego.

Las fuertes pendientes ( $di/dt$ ) características de los ensayos impulso de este tipo, hacen que aparezca una diferencia de potencial eléctrico entre dos puntos unidos por un conductor, por tal razón las salas donde se realizan ensayos con ondas impulso deben tener, como se dijo anteriormente, en el piso una malla de material conductor con el fin de fijar un potencial de referencia que sea igual en los distintos puntos de la zona de ensayo. Sin embargo cuando se arma el circuito de ensayo es inevitable la presencia de conductores simples utilizados para unir diferentes puntos del circuito que se quiere mantener al

potencial de tierra y en tales casos estos puntos pueden alcanzar potenciales distintos durante los ensayos.

Este hecho no solo puede producir interferencia en el sistema de medición sino también poner en peligro la seguridad del personal que realiza el ensayo.

En lo que se refiere a la seguridad del operador, el problema se presenta cuando dos de los equipos que están ubicados en la zona de control alcanzan potenciales distintos, existiendo el riesgo de que el operario esté en contacto con partes de cada uno de ellos. Por lo tanto, como regla general, todos los elementos que estén cercanos al operario deberán de ser mantenidos al mismo potencial.

Con respecto al sistema de medida, éste deberá conectarse directamente a los puntos entre las cuales se desea medir a fin de no perder exactitud, debiendo analizarse en cada caso y con todo detalle el circuito de medida empleado y su interacción con el circuito de ensayo propiamente dicho.

Las situaciones que puedan presentarse de acuerdo a las características constructivas de los equipos de cada laboratorio, son muy variadas, por lo que en términos generales, el sistema de puesta a tierra a adoptar será en la mayoría de los casos una solución de compromiso entre la seguridad de los operadores y la exactitud de la medición, que debe analizarse en cada situación en particular. Mas información puede verse en la referencia [4]

#### **4.11 Detección de fallas**

Debido a la naturaleza de las fallas de pruebas impulso, uno de los más importantes tópicos es la detección de tales fallas. Existiendo un gran número de indicaciones de fallas del aislamiento. Las más importantes son las siguientes:

Oscilogramas de voltaje, el humo y burbujas, falla de explosores en el flameo, ruidos audibles y oscilogramas de corriente a tierra.

##### **4.11.1 Oscilogramas de voltaje**

Los registros oscilográficos que resulten de la aplicación de las ondas plenas y reducidas no deben normalmente diferir en cuanto a su forma de onda, solo se observará un factor de escala que es la relación entre las magnitudes ó amplitudes de las ondas aplicadas.

Si por el contrario hubiera discrepancias esenciales entre los registros oscilográficos realizados en ambos casos, no atribuibles a dispositivos de protección, y por la comparación de las ondas cortadas una con otra, estas deberán ser atribuidas a una modificación sustancial de las estructuras aislantes del transformador, debidas presumiblemente a una falla de las mismas, ya sea efímera ó permanente. La naturaleza y ubicación de las fallas también puede ser, en ciertos casos, inferidas a partir del estudio de los registros oscilográficos realizados, esto se verá mas adelante.

Cualquier oscilograma que presente alguna anomalía en el sentido indicado arriba por más pequeña que sea, deberá pues ser considerado como característico de un defecto de la calidad del aislamiento. La interpretación exacta de la naturaleza de este defecto y el correcto juicio sobre su importancia, dependerán de la idoneidad y experiencia del especialista que analice los registros oscilográficos.

#### **4.11.2 Humo y burbujas**

Humo y burbujas subiendo através del aceite en el transformador son evidencias definitivas de falla. Burbujas claras pueden o no ser evidencias del problema, ellas pueden ser causadas por aire atrapado en el proceso de fabricación. Estas deben ser investigadas repitiendo la prueba o reprocesando el transformador y repitiendo la prueba para determinar si la falla ocurre.

#### **4.11.3 Ruidos audibles**

Los ruidos audibles inusuales dentro del transformador en el momento de la aplicación del impulso es una indicación de problema. Tal ruido debe de investigarse para que no quede duda de la existencia de falla.

#### **4.11.4 Falla de un explosor al flameo**

Si al realizar la prueba de onda se detecta una falla en la operación del dispositivo de recorte( este no flamea), y aun así el oscilograma de voltaje muestra una onda cortada, esto es una indicación definitiva de falla, ya sea dentro del transformador ó en el circuito de prueba y de nuevo merece una investigación completa.

#### 4.11.5 Oscilogramas de corriente a tierra

En este método de detección de falla, la corriente impulso en el terminal aterrizado del devanado bajo prueba es medida por medio de un osciloscopio conectado a través de una resistencia de derivación adecuada conectada entre el terminal normalmente aterrizado y tierra. Cualquier diferencia de la forma de onda entre la onda de corriente correspondiente a la onda completa reducida y aquella correspondiente a la onda completa plena, detectada en la superposición de los dos oscilogramas de corriente puede ser indicación de falla.

Al igual que para los oscilogramas de voltaje, el osciloscopio deberá en primera instancia, tener los barridos de tiempo presentados en la Tabla 4.18, para las diferentes pruebas. Los tiempos especificados son solamente una referencia. Deberán hacerse pruebas previas a voltaje reducido para diferentes barridos a fin de encontrar cual de ellos es más útil en la detección de fallas. Es difícil blindar el circuito de medición completamente de la influencia del alto voltaje del generador de impulso, y algunos potenciales dispersos son frecuentemente llevados, los cuales pueden producir un registro errático en el primer o en el segundo microsegundo. Tales influencias, si ocurren al principio de la onda de corriente no deberían considerarse.

El método de detección de corriente a tierra no es aplicable cuando se ensaya pruebas con onda cortada.

Tabla 4.18. Tiempos de Barrido recomendado para las Diferentes formas de onda

Tipo de Onda de voltaje	Rango de Barrido
Frente de Onda de Voltaje	2 a 5:s
Onda Recortada de Voltaje	5 a 10:s
Onda reducida de voltaje	50 a 70:s
Onda Cornpleta de Voltaje	50 a 70:s
Onda Reducida de Corriente	150 a 200:s
Onda completa de corriente	150 a 300:s

#### 4.12 Metodología de evaluación por registro de Corriente

El procedimiento para la realización de la prueba impulso está detallado anteriormente, el cual consiste en la aplicación de una onda completa plena reducida (RFW) , dos ondas cortadas (CW), y una onda completa plena (FW).

Con el propósito de evaluar el resultado del ensayo se registran los oscilogramas de la tensión aplicada y de la corriente de deriva a tierra por el arrollamiento bajo ensayo o de otra corriente que suministre suficiente información acerca del comportamiento del aislamiento del transformador. La comparación de los oscilogramas de tensión y de corriente correspondientes a las ondas completas plenas con los que provienen de las ondas completas reducidas permite estimar el comportamiento del transformador bajo ensayo. Más información puede encontrarla en la referencia [4].

##### 4.12.1 Análisis de los oscilogramas

###### 4.12.1.1 Interpretación de los oscilogramas de voltaje, de onda completa y de corriente.

De acuerdo con los requerimientos de los estándares (normas), la secuencia de la prueba de voltaje impulso nominal consistirá, como ya se ha mencionado anteriormente, de una onda reducida, dos ondas cortadas y una onda completa. Estas deben aplicarse en ese orden a cada terminal de todos los devanados del transformador especificados, excepto el terminal del neutro.

Los estándares también especifican una secuencia de pruebas impulsos mas completas, pero mas complejas, cuando se especifique la prueba de frente de onda. Como se menciono anteriormente la secuencia es una onda reducida, dos frentes de ondo, dos ondas recortadas y una onda completa.

El método mas completo y utilizado en la prueba impulso en la evaluación de la integridad dieléctrica de un transformador consiste de la ultima secuencia descrita en el párrafo anterior, covinadas con oscilogramas de corriente de neutro registrados simultáneamente con todas las ondas completas plenas de 100% y ondas completas reducidas. Ver referencia [6] y [8].

#### 4.12.1.2 Detección de fallas en los oscilogramas de voltaje de ondas completas plenas.

La prueba de onda completa es la prueba impulso mas utilizada para la detección de fallas. El voltaje al cual se hace esta prueba es el nivel básico de aislamiento al impulso (BIL) del equipo en particular.

El oscilograma de onda completa reducida se toma primero porque esta presenta la forma de onda característica de la combinación devanado del transformador y generador de impulsos que se da para un voltaje de esfuerzo y tiempo específico, considerando al transformador en buen estado. Es una referencia con lo cual se comparan los oscilogramas de las ondas completas plenas.

Cada combinación devanado del transformador con el generador de impulsos, tienen su propio modelo característico de oscilación para el impulso de onda completa plena. Estas oscilaciones permanecerán fijas en período para cualquier magnitud de voltaje impulso producida por un circuito generador de impulsos hasta el punto de rompimiento del aislamiento del transformador. Si se obtiene una igualación exacta cuando se superponen la ondas completas reducida con la onda completa de 100%, del valor de BIL, siendo esta tomada inmediatamente después de las ondas cortadas, el devanado se considera en buen estado.

El circuito combinado para pruebas impulso es generalmente complicado y algunas variaciones menores pueden ocurrir debido a este hecho. La posición de fase de algunas oscilaciones en el frente y la cresta de la onda pueden variar. Algún criterio se debe tomar al evaluar esas oscilaciones y otras que pudieran darse<sup>25</sup>. Si se obtiene una superposición de la onda reducida y la de la onda completa bajo las condiciones arriba mencionadas, el devanado se considera en buen estado. Si ocurren desviaciones de la forma de onda, no importa cuan débiles sean, o aun pequeñas oscilaciones en la cola de la onda en forma aleatoria, estas deben ser investigadas puesto que pueden indicar una fallas dentro del transformador. Además existe una comparación paralela resultante de la comparación de los oscilogramas de corriente tomados durante la prueba de onda completa reducida con aquellos tomados durante la prueba de onda completa plena.

---

<sup>25</sup> Información referente a este tema puede encontrarse en: Requirements, terminology and test code for distribution and regulating transformers and reactor, USA Standard, C57.13-1958 and revisions.

La comparación minuciosa de las ondas completas plenas y reducidas una con otra, es un criterio significativo en la detección de fallas. El hecho de que ellas sean de carácter oscilatorio, es decir que presenten oscilaciones, y no presenten una forma continua en su trazo no es significativo.

Las formas de onda de voltaje idénticas para ondas completas reducidas y la onda completa plena, representada en la figura 4.14, son igualmente indicativas del estado adecuado de la resistencia dieléctrica del transformador. Aquellas de la figura 4.13 son reconocidas como las típica "Versión didáctica" de la onda impulso de 1.2/50  $\mu$ s.

Los oscilogramas deben ser tomados de manera que sus trazos puedan ser superpuestos en tiempo y magnitud a fin de asegurar una comparación precisa de ellos.

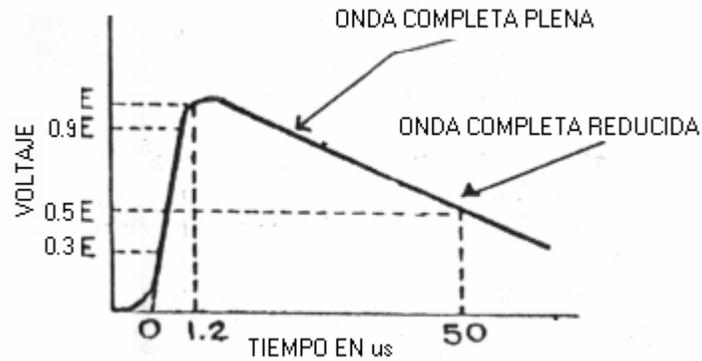


Figura 4.13. Forma de onda de voltaje comúnmente considerada como indicativa de la resistencia al impulso de un transformador.

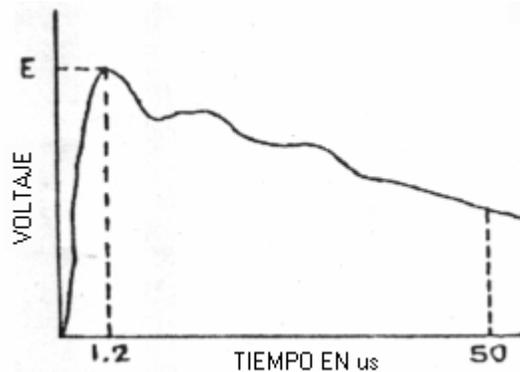


Figura 4.14. Oscilograma de las formas de onda de voltaje completa y reducida obtenidas en un circuito pobremente acoplado.

La figura 4.15, muestra los oscilogramas de los devanados de alto voltaje de transformadores construidos por diferentes fabricantes. Todos ellos se comportaron sin fallas después de la secuencia de pruebas impulso.

Si ha habido falla, esta será reflejada por medio de cambios en el dieléctrico, la cual causará alteraciones de la forma de onda como consecuencia de un cambio de la impedancia del transformador o desarrollo de trayectorias de descarga de corona.

Como se mencionó anteriormente, fallas obvias son detectadas por humo, burbujas, ruido y cambios en oscilaciones. Cualquier diferencia en la superposición de los oscilogramas denota falla en los devanados (excepto ciertas desviaciones menores discutidas mas adelante). Las fallas principales aparecerán como un colapso completo o parcial de la onda completa plena que generalmente aparece antes de  $50\mu\text{s}$  y el oscilograma de corriente simultáneo de la onda plena nos ayudará en la verificación, mostrando la variación sustancial de los oscilogramas de corriente de onda plena y reducida.

En caso de fallas principales tales como fallas internas del aislamiento de los devanados, rompimiento de una bobina hacia tierra cortocircuitando el conductor de línea hacia tierra o hacia otra bobina y fallas en un bushing, el patrón de la impedancia del transformador ha sido sustancialmente alterado. La figura 4.16 muestra un tipo de cambio típico producido por una falla cerca del terminal de línea hacia tierra. La figura 4.17 ilustra una falla de un pequeño segmento del devanado.

Estos cortocircuitos en los devanados reducen la impedancia efectiva acortando la cola de la onda.

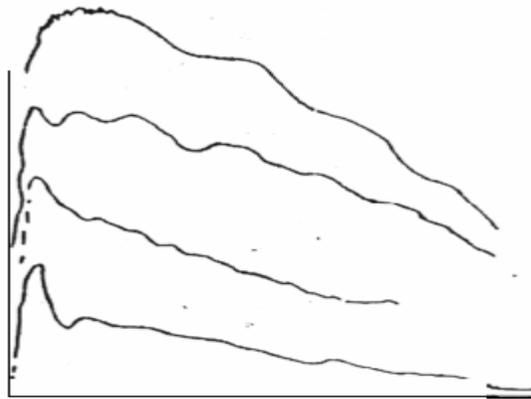


Figure 4.15 Oscilogramas de ondas copletas plenas de cuatro diferentes devanados de transformadores los cuales se superpusieron a sus respectivas ondas completas reducidas. Ilustrando variaciones de la forma de onda característica de los transformadores.

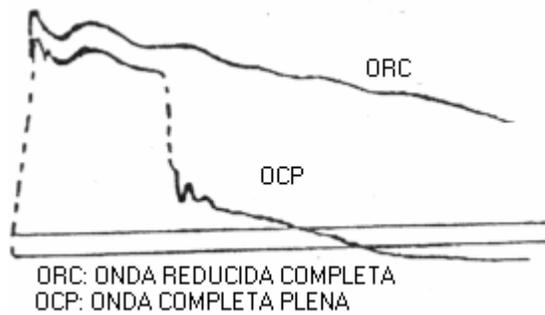


Figura 4.16 Falla de conductor de línea a tierra.

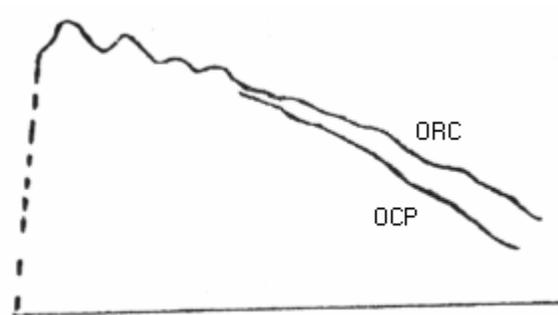


Figura 4.17 aproximadamente al 8.5% del devanado fallo.

Otro ejemplo de una falla interna sería representada por una caída del trazo de voltaje de la onda plena justo pasado el pico. Este tirón hacia abajo no aparece, como es de esperarse, en al trazo de la onda completa reducida. Una posible causa de este cambio en la forma de onda puede ser debido a una severa corona interna, ilustrada en la Figura 4.18. También se podría indicar como una falla de sección a sección o da bobina a bobina.

Puede presumirse de falla da bobina a bobina(falla transversal) cuando aparece una desviación menos sustancial entre la onda completa reducida y la onda completa plena.

Cuando la desviación ocurra cerca de la cresta la falla podría haberse producido cerca del terminal de línea del devanado, tal como se indica en la figura 4.19. Los oscilogramas deben analizarse cuidadosamente.

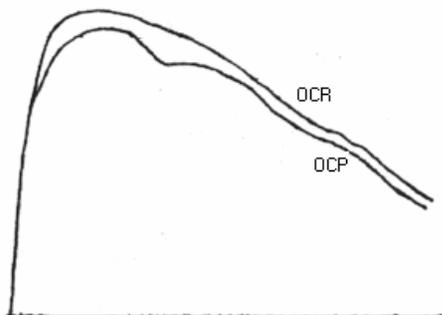


Figura 4.18 Falla indicativa de una avería de bobina a bobina o ana severa corona interna.

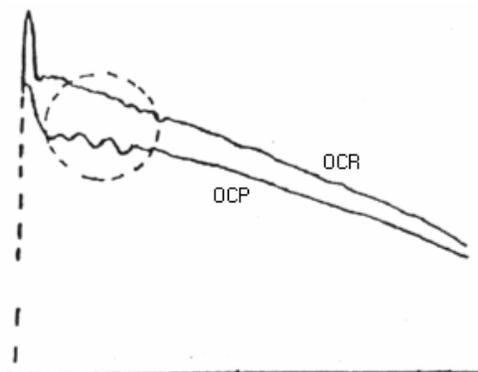


Figura 4.19 Falla de bobina a bobina cerca del terminal de línea.

En general podemos decir que las fallas longitudinales importantes en el arrollamiento se notan ya sea como quibre de la onda de tensión, oscilaciones, o un acortamiento de la cola de la onda. Las fallas a tierra, en cambio, se manifiestan siempre como disminuciones bruscas (colapso), en la onda de tensión. En caso de producirse pequeñas fallas, es decir que intervienen una pequeña porción del arrollamiento, las mismas generalmente no se manifiestan en los oscilogramas de tensión y es por tal razón que debe recurrirse a los oscilogramas de corriente para obtener un resultado definitivo a cerca del comportamiento del transformador bajo ensayo.

#### 4.12.1.3 Procedimientos de diagnostico especial

Hay muchas modificaciones de la secuencia de pruebas impulso, así como también procedimientos de diagnostico especial, los cuales se han vuelto de uso común. Una de tales modificaciones consiste en aplicar una segunda onda completa reducida inmediatamente después de realizar la prueba de frente de onda e inmediatamente antes de las dos ondas cortadas. Esta modificación a la secuencia de pruebas impulso permite una comparación de la primera onda reducida tomada con el arreglo original con la onda completa reducida del generador de impulsos, tomada después de que los parámetros del circuito se alteran al hacer la prueba de frente de onda. Puede haber alguna diferencia entre las dos ondas completas reducidas debido a cambios en el circuito externo y si esto es así, la última de las ondas reducidas debería ser la referencia. Algunas veces los cambios no son debidos a modificaciones en el transformador. Una forma fácil de confirmar que esas diferencias no son debidas a cambios en el transformador consiste en tomar una serie de ondas completas reducidas. Si todas estas ondas no presentan diferencias con la onda reducida tomada después de la de frente de onda, puede asumirse que el cambio fue externo al transformador.

En el caso de que se de una indicación de falla un procedimiento de diagnóstico especial con éxito involucra la realización de una serie de ondas completas reducidas al 50, 60, 70, 80 y 90 % del nivel de voltaje de onda plena. Aplicar luego una onda completa de 100% seguida de un frente de onda, después las ondas cortadas y por último una onda completa de 100%.

Otra técnica propuesta en la referencia 2 consiste en la aplicación de ondas con incremento progresivo de la tensión. Por ejemplo se aplica ondas de 30, 50, 60, 70, 80 y 90% de la tensión que corresponde a la onda plena. Luego se aplican

dos ondas plenas y por último se baja la tensión en escalones iguales a los enumerados anteriormente. De esta forma se obtiene una muy buena información del comportamiento del equipo bajo ensayo y por otra parte, si existe una falla es posible determinar el nivel de tensión en que esta se manifiesta.

#### 4.12.1.4 Efecto de la magnetización del núcleo en la detección de falla

Se ha encontrado que en algunos transformadores de potencia y de distribución de las clases de voltaje mas bajas , la aplicación de impulsos sucesivos de ondas plenas pueden causar una acumulación de magnetización residual del núcleo. En tales casos, las ondas de voltaje y de corriente debido a impulsos sucesivos muestran cambios progresivos, tal como se muestra en la figura 4.20. También el ruido producido en el transformador se incrementa con impulsos sucesivos.

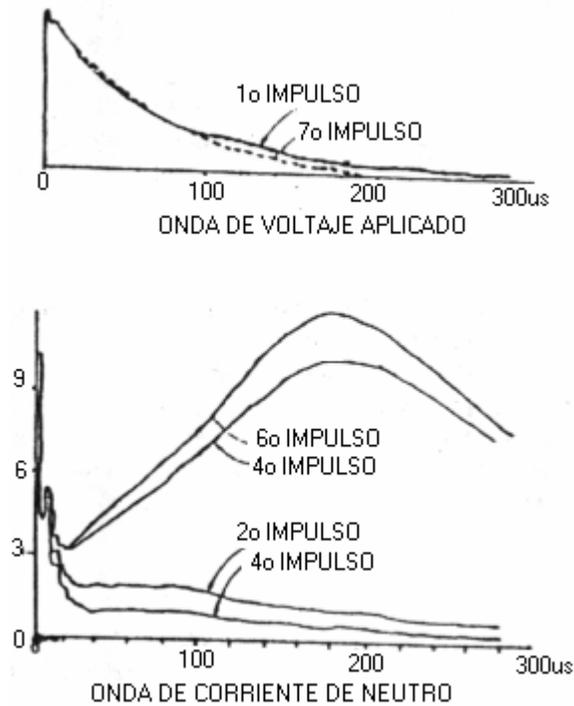


Figura 4.20 Efecto de la magnetización del núcleo en la detección de fallas.

El que tal efecto ocurra, o no, en un transformador depende grandemente de la razón del voltaje impulso al voltaje de operación del devanado bajo prueba. Esta razón es más alta a niveles de voltaje menores de modo que el efecto magnético de una onda impulso se vuelve mucho mas pronunciada. Para demostrar la presencia de este efecto de magnetización residual, uno puede aplicar varias ondas impulso mostrando un incremento progresivo de la corriente. Entonces invirtiendo la polaridad de la onda Impulso, o aplicando el impulso al otro terminal del devanado, la dirección de flujo magnético puede ser invertida y la onda de corriente comenzará de nuevo a valores bajos tendiendo a incrementarse con impulsos sucesivos. Si se repite este proceso, es obvio que el incremento de la onda de corriente, o el acortamiento de la cola de la onda de voltaje son debidos al efecto magnético y no debido a una falla.

Este efecto se puede minimizar restaurando el núcleo a un nivel de magnetización conocido previo a la aplicación de cada impulso. Un método de desmagnetizar el núcleo es utilizando excitación de 60 Hz (ver referencia [8]). Otro método es llevar el núcleo a una magnetización residual máxima de polaridad opuesta utilizando repetidas ondas completas de 50% de colas largas. Estas pueden ser de polaridad opuesta a las ondas de prueba actuales, o de la misma polaridad pero aplicadas al terminal opuesto del devanado. Aún entonces, si el efecto de magnetización es pronunciado, puede haber una pequeña diferencia entre las ondas de 50% y 100%..

#### **4.12.1.5 Detección de fallas en los oscilogramas de corriente**

El método de detección por oscilogramas de corriente es un indicador muy sensible para la detección de fallas. Tales ondas de corriente merecen consideración en el diagnóstico de problemas asociados con pequeñas irregularidades, puesto que estas irregularidades y pequeñas fallas representan el principal problema en la detección de fallas por impulso. Este método ha probado ser efectivo en la detección de efectos de corona debidos al impulso en transformadores.

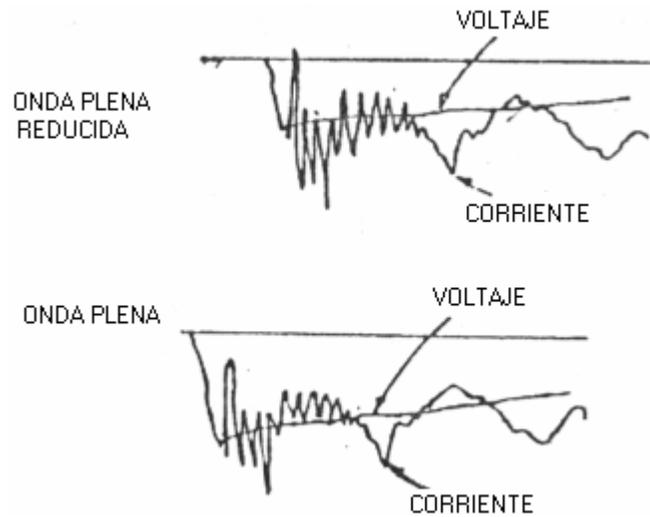


Figura 4.21 Oscilogramas de un devanado de un transformador trifasico de gran traio.

La figura 4.21 muestra la onda de voltaje reducida plena, así como los oscilogramas de corriente de un devanado de alto voltaje de un transformador. Una comparación de las ondas de voltaje muestra una desviación. Examinando los trazos de corriente tomados se ve que enfatizan esta desviación. Se determinó que estas desviaciones se debían a una ionización interna.

Se requiere buen juicio y discriminación en la interpretación de oscilogramas de corriente para evitar la posibilidad de que un transformador en buen estado sea considerado defectuoso, sobre la base de que todas las pequeñas irregularidades sean de naturaleza dañina. Los oscilogramas de corriente casi siempre verifican y magnifican las pequeñas irregularidades encontradas en las ondas de voltaje discutidas anteriormente.

#### I- Pequeñas fallas

A veces las diferencias en los oscilogramas de las ondas de voltaje aplicado son muy ligeras, o no son perceptibles especialmente cuando ha habida una falla entre dos puntos adyacentes en el arrollamiento. Los oscilogramas de corriente tomados simultáneamente, usualmente dan una clara indicación de un cortocircuito aun si estas fallas no comprendan más que una vuelta en más de miles de vueltas totales del arrollamiento. Ver figuras 4.22 y 4.23.

La forma y la amplitud de la corriente a través de los devanados dependen de la inductancia del devanado y de la resistencia de aterrizamiento que se utiliza. Un corto

circuito significa un decremento de la inductancia lo cual resulta en un cambio en la corriente a través de la derivación.

Debido a la impedancia (resistencia e inductancia) serie existente entre el transformador y el generador, los cambios en la corriente del devanado resultan en un cambio en el voltaje de la onda aplicada al arrollamiento. La magnitud del cambio de voltaje depende de la impedancia del devanado del transformador relativa a la impedancia del circuito impulso principal. Si la impedancia del circuito impulso es baja de manera que represente a una fuente de voltaje constante, se requerirán grandes cambios en la corriente del devanado para producir cambios en el voltaje. En este caso la detección de falla en el oscilograma de voltaje es improductiva. Inversamente, si el circuito impulso posee alta impedancia comparada con la del devanado, la detección de falla en el oscilograma de voltaje se convierte en una buena opción. El método de corriente tiene la ventaja de que no depende de la constancia del circuito impulso. Sin embargo, cuando se utiliza una resistencia de aterrizamiento empleada para mantener la cola a  $50\mu\text{s}$  en devanados de baja impedancia, la sensibilidad del método de corriente puede decrecer.

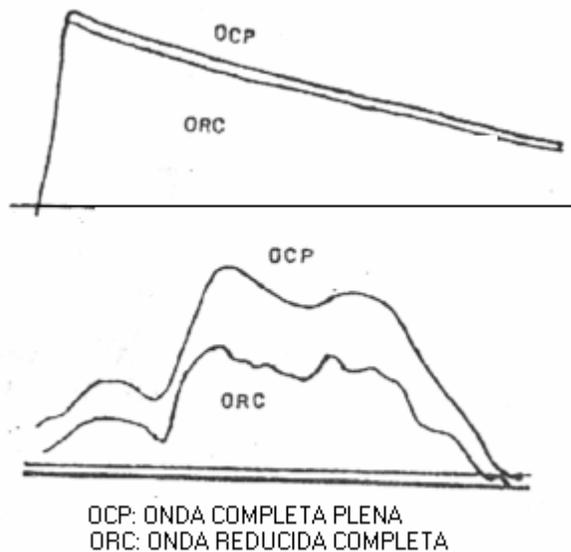


Figura 4.22. La onda de voltaje da una ligera indicación de la falla. La onda de corriente muestra claramente la falla.

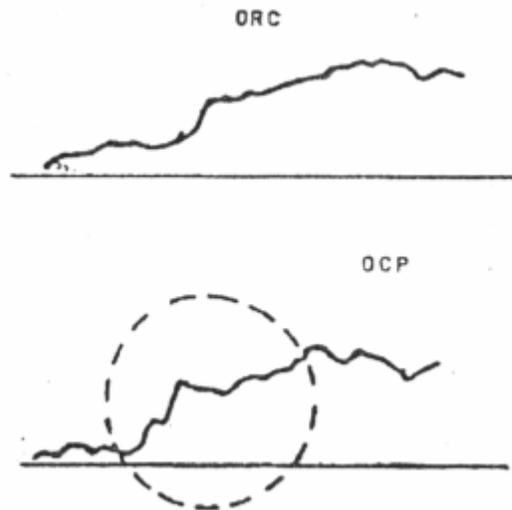


Figura 4.23. La no superposición de las ondas de corriente revelan una falla de vuelta a vuelta, involucrando un pequeño porcentaje del devanado.

En resumen el método de registro de corriente, utilizado con buen criterio, es un excelente indicador de todo tipo de falla, ya que debido a su gran sensibilidad es capaz de detectar las menores fallas, tal como las producidas en una pequeña porción del devanado.

Los casos más típicos de fallas detectadas por reistrosde corriente se presentan en el oscilograma como:

- Variaciones en la magnitud de la onda.
- Variaciones de la frecuencia de oscilación de la onda.
- Ligeras modificaciones en la forma de la onda.
- Oscilaciones de alta frecuencia en una pequeña porción de oscilograma superpuestas a la onda fundamental.
- Oscilaciones de alta frecuencia en distintas partes de un mismo registro superpuestas a la onda fundamental.

Es importante destacar que en algunos casos existen factores externos al transformador que originan oscilaciones parásitas de alta frecuencia que se superponen a las señales que se deben registrar y que si no se cuenta con la experiencia necesaria en este tipo de pruebas, pueden plantearse dudas a cerca del resultado del mismo.

Así por ejemplo un incorrecto blindaje del osciloscopio y de los cables coaxiales utilizados en la medición permite la

aparición de señales de alta frecuencia en los oscilogramas debidas a la inducción electromagnética producida por la influencia de de la descarga del generador de impulso o de otras señales parásitas.

Otros factores que producen oscilaciones de alta frecuencia son los falsos contactos en el conexionado e incorrectas tomas de tierra, pequeñas descargas producidas entre elementos conductores extraños al ensayo y tierra debidas a tensiones inducidas desde el circuito de ensayo, efecto de corona en las conexiones de alta tensión.

Variaciones en el disparo del generador debidas a un cambio en el ajuste de las distancias de separación de los explosores o producidas por distintas formas de aproximación de los mismos para el disparo o por efectos de la desigual ionización del aire circundante debido a descargas previas, son factores que tambien generan oscilaciones de alta frecuencia en el comienzo de los oscilogramas. Tales oscilaciones van variando con los distintos disparos en forma aleatoria. Por esta razón el primer microsegundo de los oscilogramas suele ser desechado al comparar los diferentes registros con la correspondiente onda de referencia.

Para evitar algunos de los efectos antes mencionados se debe tener en cuenta las siguientes recomendaciones generales:

- 1- Es de especial importancia que el osciloscopio tenga buen blindaje.
- 2- Previo a la aplicación de ondas de impulso verificar todo el conexionado con el objeto de asegurar todos los contactos y constatar además que no existan objetos metálicos en las cercanías del objeto bajo prueba.
- 3- Poner a tierra cualquier punto flotante de equipamiento cercano a la zona de ensayo.
- 4- Usar conductores tubulares de diámetro adecuado en el conexionado de alta tensión con el objeto de evitar efectos de corona.
- 5- Mantener adecuadas distancias de separación entre la zona de ensayo y las paredes circundantes.
- 6- Disponer de tomas de tierra de forma tal que se eviten errores de medición.

Aunque pueda resultar obvio debe mencionarse que mientras se están registrando los oscilogramas de onda reducida y plenas

aplicadas a un mismo arrollamiento no deben efectuarse modificaciones en el circuito por pequeña que sea, en caso contrario pueden aparecer diferencias entre los oscilogramas que no sean atribuibles a defecto de aislamiento.

Todos los factores previamente mencionados pueden considerarse como externos al transformador. Existen, sin embargo, factores internos al transformador capaces de causar efectos similares sobre el oscilograma. Ejemplos de tales factores son: Una deficiente conexión eléctrica entre el núcleo y el tanque del transformador, descargas provenientes de burbujas de aire atrapadas en el aislamiento a causa de una técnica de impregnado incorrecta. En todos estos casos las anomalías que presentan los oscilogramas de ensayos indicarán un "defecto de calidad", cuyas causas con sin embargo fácilmente subsanables.

Todas las irregularidades que puedan aparecer en los registros deben ser analizados cuidadosamente a fin de no juzgar erróneamente el comportamiento del transformador bajo prueba y solo una experiencia suficiente en este tipo de pruebas hace posible una correcta interpretación de los resultados obtenidos.

Cuando hay duda sobre la existencia real de un defecto del aislamiento porque los oscilogramas muestran una anomalía demasiado pequeña, lo recomendable es la aplicación de tres ondas plenas consecutivas adicionales para verificar si la dudosa anomalía se acentúa. Lo indicado en un caso así es que los impulsos adicionales, en número de 3 a 5, se sucedan lo más rápido posible (en el orden de los 30 segundos entre uno y otro).

Así el defecto, si existe, se agravará haciéndose más visible sobre los oscilogramas., ya que la rapidez con que se repite la prueba no deja tiempo a que el aislamiento se recupere gracias a la renovación del aceite que degrada las eventuales descargas locales por el aceite limpio que circula por los canales del arrollamiento.

Una técnica de gran utilidad es la realización de ondas con incremento progresivo de tensión. Así por ejemplo es posible aplicar ondas de 30, 50, 60 y 90%, de la tensión correspondiente a la onda plena, luego se aplican dos ondas plenas y por último se baja la tensión en escalones iguales a los mencionados anteriormente. De esta forma se obtiene una muy buena información del equipo bajo prueba y por otra parte, si existe una falla, es posible determinar del nivel de tensión a la que se manifiesta.

#### 4.12.1.6 Interpretación de los oscilogramas de onda cortada y de frente de onda

##### I- Introducción

La prueba impulso, hecha en los devanados de transformadores con forma de onda, las cuales aproximadamente simulan aquellas ondas que podrían presentarse cuando el transformador esté en servicio y sea afectado por descargas atmosféricas o sobrevoltajes transitorios, se han descrito anteriormente. Las ondas completas representan aquellas que alcanzan el devanado después de haber viajado una cierta distancia a lo largo de la línea de transmisión.

En esta sección se discuten las ondas cortadas y los frentes de onda. Ambas tratan de simular el efecto que tiene sobre el transformador un golpe directo o muy cercano producido por un rayo. Las ondas cortadas resultan cuando un rayo causa el flameo de aisladoras, explosores ó equipo cercano después que el efecto producido por este ha viajado a través de la línea una corta distancia hacia el transformador. Se desarrollan grandes esfuerzos en la porción de la línea conectada al devanado debido a la magnitud del voltaje y al cambio rápido resultante del flameo.

Mientras que la onda cortada alcanza su valor de cresta es entonces recortada después de un intervalo de tiempo especificado, la prueba de frente de onda se identifica por una subida de voltaje rápida y recortada cuando todavía no ha alcanzado su valor de cresta. Esta última onda simula el golpe directo de un rayo, o muy cerca, el cual aplica un impulso de voltaje al terminal del transformador elevándose rápidamente hasta que opera un explosor de protección. Si se proporciona una protección con un pararrayos el voltaje alcanzado será considerablemente más bajo. Los estándares o normas especifican el voltaje de cresta, el tiempo al flameo y la razón de subida mínima efectiva para realizar la prueba. La onda prueba la habilidad del devanado y su estructura dieléctrica para resistir este inesperado voltaje impulso.

##### II- Detección de fallas durante la prueba de onda recortada

La discusión de las ondas completas enfatiza que la comparación de la onda plena con la reducida es el criterio fundamental en la evaluación de la integridad dieléctrica del devanado que está siendo probado. Las ondas cortadas deben compararse una con otra y además ser comparadas a la onda completa reducida y la onda completa de 100 % hasta el

tiempo de recorte para suministrar una determinación aún mas completa del buen estado del aislamiento.

Los esfuerzos en los devanados asociados a las ondas cortadas pueden ser bastante diferentes de aquellos asociados a ondas completas. Las ondas cortadas ejercen grandes esfuerzos a lo largo de todo el devanado. Los frentes de onda generalmente producen esfuerzos en las bobinas del devanado cercanas al terminal de línea.

Durante la prueba de onda cortada, los esfuerzos máximos en las bobinas pueden alcanzar valores de varias veces los esfuerzos que produciría la onda de 1.2/50  $\mu$ s. Esto se debe a la variación a la cual la onda entrante es cortada y al hecho de que las oscilaciones electromagnéticas son producidas alrededor de la línea de cero (Ver figura 4.24). Un transformador en servicio puede estar sujeto a condiciones de onda cortada, como cuando un bushing, un aislador, o un explosor flamean hacia tierra.

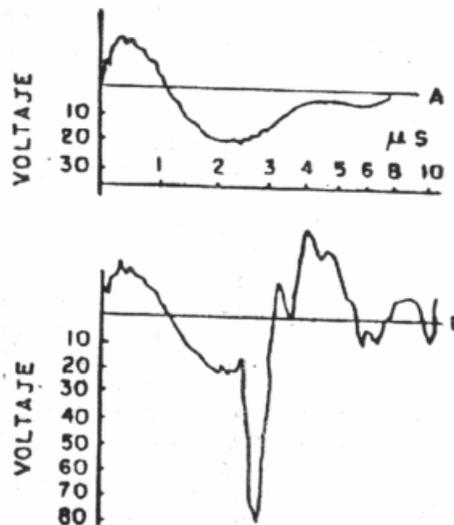


Figura 4.24 A. Indica una diferencia de potencial eentre los extremos de las primeras dos Bobinas para una onda completa la cual posee un frente de 2.2 $\mu$ s. B. Indica la misma condicion que para A, pero para una onda cortada de 2.5 $\mu$ s.

La detección de fallas durante las pruebas de onda cortada es más difícil que con ondas plenas. Para las pruebas impulso de onda cortada no se espera obtener idénticas oscilaciones después del recorte, a menos que los tiempos al recorte sean idénticos. Hay ocaciones cuando un devanado se considera que ha pasado la prueba de onda cortada, aunque las oscilaciones producidas alrededor de la línea de cero

después del recorte presentan similitud pero no son verdaderamente idénticas, al comparar una onda cortada con otra. La interpretación y la importancia de cualquier desigualdad en las oscilaciones al rededor de la línea de cero en los oscilogramas de onda cortada es un tema de análisis teórico y práctico balanceado con experiencia, además de familiaridad con el grado de precisión del equipo de prueba impulso que se utiliza. Cuando las comparaciones de las oscilaciones alrededor de la línea cero indican desviaciones obvias, tales desviaciones pueden ser indicativas de fallas. La figura 4.25 ilustra lo que se considera como una igualación perfecta de dos ondas cortadas aplicadas a un devanado. La figura 4.26 muestra el caso de una desviación obvia en los oscilogramas de las ondas cortadas, indicativa de falla. Las desviaciones antes del recorte son aún indicaciones más positivas de fallas.

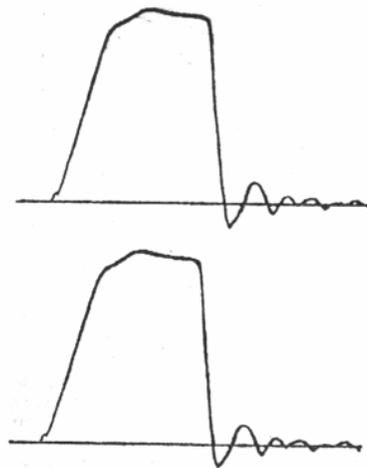


Figura 4.25 Una buena igualación de dos ondas cortadas a un devanado.

Puesto que algún flujo debido al efecto de corona está presente en ondas cortadas justo antes o en el tiempo del recorte, puede ocurrir alguna variación en la redondez del borde de caída en este punto y causar variaciones en la forma de onda y en la cola, las cuales son inevitables.

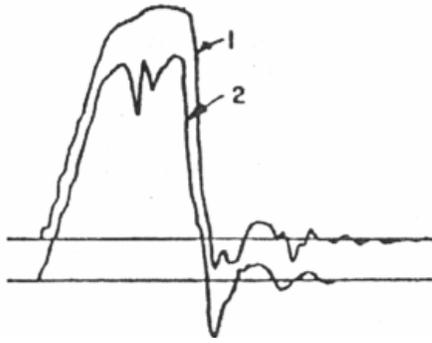


Figura 4.26 Falla a través del devanado de alto voltaje de un Transformador en la aplicación de ondas cortadas.

Puesto que los esfuerzos en los devanados producidos por ondas cortadas son bastante diferentes de aquellos causados por las ondas completas, algunas fallas causadas por ondas cortadas pueden pasar desapercibidos debido a que las ondas completas no pueden causar un arco para golpear de nuevo través de la trayectoria de la falla producida por la onda cortada. Para minimizar esta posibilidad, la onda completa debe ser aplicada lo más pronto posible después de las dos ondas cortadas a fin de reducir la posibilidad de que la falla producida por las ondas cortadas se selle y no se manifieste en la prueba de onda completa.

### III-Deteccion de fallas durante las pruebas de frente de onda

Las pruebas de frente de onda somete a los devanados a magnitudes de voltaje muy grandes y a la parte del devanado conectado a la línea a esfuerzos en muchos casos mas elevados que aquellos debidos a ondas cortadas y todavía mayores que aquellos producidos por la onda plena. La prueba de frente de onda es un buen ensayo de lo adecuado del diseño y construcción de la porción del devanado conectado a la línea, para resistir altas variaciones en las elevaciones de voltaje. Se aplican dos o más frentes de onda, cuando así se especifica, después de la aplicación de la onda reducida y antes de la onda cortada y de las ondas plenas de 100%.

Si al comparar los oscilogramas de los dos frentes de onda se observa una perfecta superposición, excepto por variaciones en tiempo o magnitud de pequeños rizados, entonces pueden aplicarse subsecuentemente las ondas cortadas. La figura 4.27 muestra la comparación de los oscilogramas de dos frentes de onda para un mismo devanado. Este pasó las pruebas de frente de onda.

Las desviaciones detectadas de la comparación de las pruebas de frente de onda pueden indicar que cualquier superficie, esquina o borde, en el extremo del devanado conectado a la línea está contribuyendo a la formación de ionización dentro del transformador. Estas desviaciones pueden revelar la presencia no dañina de efecto de corona la cual no será progresiva bajo las condiciones de esfuerzo producidas por el frente de onda; o bien pueden pronosticar fallas en el devanado en las subsecuentes aplicaciones de ondas cortadas de más duración y aún más en las ondas plenas. Estas desviaciones también pueden indicar defectos externos en el circuito impulso. Cualquier duda de que si el devanado ha resistido la prueba de frente de onda debe ser resuelta, determinando las fuentes de las desviaciones, o en el caso de desviaciones menores, por medio de la aplicación de otros frentes de onda para demostrar si la desviación permanece igual o aumenta progresivamente. La figura 34 ilustra una falla en la prueba de frente de onda. Las pruebas de frente de onda son muy efectivas para producir las condiciones de esfuerzos que conducen a fallas de vuelta a vuelta. Esto es debido al incremento de la magnitud del voltaje a razones de subida altas a través de las vueltas cercanas al extremo conectado a la línea.

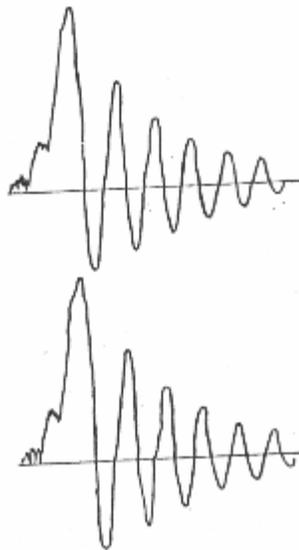


Figura 4.27 Comparacion para pruebas de frente de onda

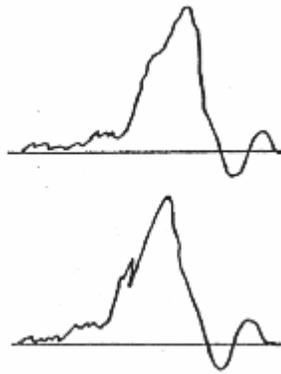


Figura 4.28 Falla indicada en el frente de la onda al comparar los oscilogramas de dos frentes de onda.

Las ondas cortadas pueden ser igualmente eficientes en muchos diseños de transformadores para revelar lo inadecuado del aislamiento entre vueltas ubicadas más en medio en el devanado, pero la resistencia entre vueltas recibe su prueba mas grande en aquellas vueltas situadas cercanas al extremo conectado a la línea. La falla entre vueltas puede detectarse cuando existe una considerable diferencia entre las ondas, recortadas después de que los frentes de onda han sido recortados a cero. La no superposición de los oscilogramas después del recorte puede ser una indicación de falla, o bien deberse a un cambio en el circuito de tierra. (Ver figura 4.29). Si las oscilaciones se repiten sin cambios mayores en la forma de onda, la prueba se considera satisfactoria. Es posible que una falla pueda ocurrir en la subida de la onda, tal como sucede en la figura 4.28.

Las ondas recortadas y los frentes de onda permiten frecuentemente la, determinación del tipo y localización de la falla detectada, cuando se estudian en forma conjunta con las ondas completas plenas y cuando se tiene un cuidado particular para asegurar que las discrepancias no debidas a tiempos de recorte diferentes.

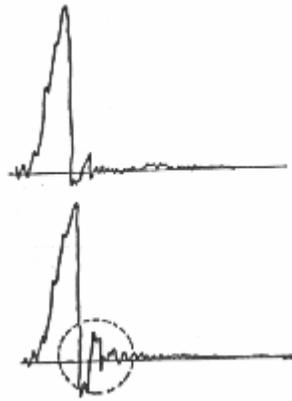


Figura 4.29 Indicación de falla en la comparación de dos oscilogramas de frente de onda.

#### 4.13 Reporte de pruebas

Desde un punto de vista técnico el reporte de pruebas debería ser la hoja que se muestra en la figura 7.27 de la referencia [4]. Sin embargo como además debe mantenerse un efectivo control; sobre el equipo sometido a prueba, deberá de asignarse a este un expediente con su código correspondiente, el cual dependerá del equipo a probar. Por ejemplo si se trata de aisladores puede iniciarse con ASUS para aisladores suspensión, ASP para aisladores tipo pin y TRNF para transformadores.

A este expediente deberán adjuntarse una hoja de recepción y una hoja de entrega (devolución) del equipo. Además deberá adjuntarse las hojas de reporte de pruebas presentado para el equipo. Este reporte se identificaría con un número. El reporte además deberá incluir los oscilogramas que muestran la forma de onda obtenida en cada prueba realizada.

Un ejemplo de hoja de recepción se muestra en la Tabla 4.6; mientras que una hoja de entrega se muestra en la Tabla 4.7.

La hoja de reporte para la prueba impulso en transformadores se muestra en la figura 7.27 referencia [4], en ella deben especificarse todos los datos necesarios del equipo sometido a prueba, cada uno de los terminales sometidos a prueba y los tipos de prueba aplicadas a cada uno de ellos. Debe especificarse además las normas en las cuales se basa la prueba y especificar si el transformador cumple con las normas. Si la cumple se indicará en la casilla "Resultado", satisfactorio; si lo contrario ocurre deberá especificarse no satisfactorio. Deberán hacerse

además las observaciones del caso, tal como las pruebas realizadas previo a la realización de la prueba impulso.

#### 4.13.1 Resumen de pruebas en transformadores

El ensayo impulso en transformadores comprende un serie de ondas impulso aplicadas de distintas formas, las cuales, se describieron como: Onda completa reducida(OCR), Onda recortada (OR) , Frente de onda (FDO) y Onda completa plena(OCP). La onda completa reducida es la que se utiliza como onda de referencia con la que se compara el oscilograma de la onda completa plena. La onda recortada simula el colapso de voltaje que produce cuando un aislador o pararrayo flamea cerca del transformador produciendo condiciones severas dentro del devanado. La frente de onda somete a los devanados a grandes esfuerzos al producirse una descarga muy cerca o directamente en los terminal es del transformador. La prueba de onda completa simula una onda viajando a través de la línea la cual ha sido producida como resultado de una descarga atmosférica en la misma,

El laboratorio de la prueba impulso de la Escuela de ingeniería eléctrica de la UES puede generar los impulsos antes mencionados para equipos cuya clase de aislamiento que esté en el rango de hasta 69 KV. La tabla 4.19 es una tabla resumen de las distintas pruebas que es posible realizar con el generador de impulsos disponible para las clases de aislamiento ya mencionadas. En la tabla puede notarse que la prueba de frente de onda solo puede realizarse en equipos cuya clase de aislamiento sea de hasta 34.5 KV; mientras que la prueba de onda recortada solo puede realizarse para equipos cuya el clase de aislamiento es de hasta 60KV.

Tabla 4.19. Resumen de pruebas en transformadores

CLASE DE AISLAMIENTO (KV)	TIPOS DE PRUEBAS			
	OCR	OR	FDO	OCP
1.2	*****	*****	*****	*****
2.5	*****	*****	*****	*****
8.7	*****	*****	*****	*****
15	*****	*****	*****	*****
18	*****	*****	*****	*****
25	*****	*****	*****	*****
34.5	*****	*****	*****	*****
46	*****	*****		*****
60	*****	*****		*****
69	*****			*****

Donde:

O C R = Onda completa reducida

O R = Onda recortada

F D O = Frente de onda

O C P = Onda completa plena

## CONCLUSIONES DEL CAPITULO IV

La realización de la prueba impulsa tiene un alto grado de complejidad, especialmente en la realización de la prueba en transformadores, debido a factores tales como la gran complejidad de su estructura aislante, los tipos de pruebas y equipo de laboratorio que rige la realización de tales pruebas, así como las medidas que deben tomarse para una correcta conexión de los distintos equipos involucrados y un adecuado blindaje del sistema de medición a fin de evitar la superposición de señales parásitas en los oscilogramas y emitir un juicio errado a cerca del estado del aislamiento del transformador.

La complejidad de la prueba impulso, especialmente la que se realiza en transformadores, exige del personal encargado de realizar las pruebas y del personal encargado de realizar los análisis, sólidos conocimientos y gran experiencia en este tipo de pruebas.

La prueba impulso en aisladores siempre estará rodeada de alguna dispersión en los resultados debido a la naturaleza de las mediciones las cuales siempre requieren algún tratamiento estadística y están influenciadas por las condiciones ambientales.

- Dependiendo de la cantidad de materiales que contamine el aislador, este podría llegar deteriorado por un flameo continuo.
- Cuando la contaminación depositada en el aislador es conductora con el contacto del agua, se da flameo en el aislador, aun cuando la sobre tensión sea elevada.

De los gráficos obtenidos en el calculo de corriente a tierra (figura 4.20 y 4.23) y comparándolos con los obtenidos de la simulación en ATP (capitulo 5), se puede ver que hay una gran diferencia. La corriente simulada para un voltaje máximo de 100KV es de aproximadamente 30KA y de los gráficos obtenidos con el osciloscopio 65KA. Habría que analizar mas con detalle este problema y utilizar un equipo de medición de corriente mas sofisticado o preciso.

De los gráficos de voltaje obtenidos con el osciloscopio para un rango de carga de 15KV a 50KV mostrados en la tabla 4.13, y comparándolos con los obtenidos de la simulación en ATP, mostrados en la Tabla 5.4, podemos decir que no presentan diferencias grandes en los datos a la salida del divisor de voltaje.

Hay que recordar que para no obtener resultados no deseados en el osciloscopio, este debe estar alimentado únicamente con la batería del mismo. Si es conectado al toma de 110V los datos o gráficos obtenidos son alterados por ruido, incrementando la magnitud lo cual pone en duda cualquier resultado.

## REFRENECIAS BIBLIOGRAFICAS

- [1] - A. Pedersen y Suend Vindholm,  
"Análisis of Spark Breakdown Characteristics for Sphera Gaps", IEEE Transaction On Power Apparatus and System, Vol. Pas-86, No 8 August 1967.
- [2] - Rincón C., Raúl J. y Cantillo G., Ernesto.  
Aislamiento en ambientes contaminantes. Ensayo y Normalización. Bucaramanga 1988,84 Págs.  
Tesis. Universidad Industrial de Santander.
- [3] - José Edgardo Mauricio Gutiérrez y Mario Alberto Monge  
"Estudio de la coordinación de los aislamientos y protecciones en líneas eléctricas de distribución"  
Trabajo de graduación Julio 1995. UES
- [4] - Osvaldo Adolfo Campos y Jorge Alberto Galdamez  
"Generador de impulsos de alto voltaje aplicaciones industriales y manual de operaciones"  
Trabajo de graduación, Enero 1991. UES
- [5] - Arias O., Juan O. y Luna Edgar. Accesorios necesarios para la prueba de aisladores en húmedo y con contaminantes. Diseño y montaje. Bucaramanga, 1987, 72 Págs. Tesis. Universidad Industrial de Santander.
- [6] - American National Standard Test  
Code for Distribution, power, and regulating Transformers, C57.12.90-1973(IEEE Std 262-1973)
- [7] - American National Standard General Requirements  
For distribution, power and regulating Transformers, C57.12.00-1973(IEEE Std 462-1973)
- [8] - American National Standard IEEE Guide for  
Transformers Impulse tests, C57.98-1968.
- [9] - Frediani, Roberto H. Y Jean Riubrugent,  
"Análisis de la metodología y aplicaciones del ensayo de impulso sobre transformadores"

## NORMAS

- Norma ICONTEC 1285 basada en la norma ANSI C29-1/82: describe el montaje y los ensayos eléctricos que deben realizarse a los aisladores de potencia.
- IEEE - 4 Standard Techniques for High -Voltage Testing basado en la norma ANSI/IEEE std 4 -1978: en la cual se

enumeran los procedimientos generales para las pruebas de aisladores en condiciones húmedas y con contaminantes.

- Norma ICONTEC 739 basada en la norma ANSI C29-5/84: esta norma especifica los valores de flameo en húmedo para los diferentes tipos de aisladores tipo pin.
- Norma ICONTEC 1170 basada en la norma ANSIC29-2/83: en la cual se tratan especificaciones de flameo en condiciones húmedas, para las diferentes clases de aisladores tipo suspensión.

## CAPITULO V

### ANALISIS DEL COMPORTAMIENTO DE LINEAS DE DISTRIBUCION AEREAS FRENTE AL RAYO.

#### Introducción.

Las sobretensiones atmosféricas son una de las mayores causas de contorneamientos en líneas aéreas de distribución. Un rayo puede originar una sobretensión que termine provocando un fallo en la línea aérea afectada o que se propague por la línea y pueda provocar una avería en otro equipo. La magnitud de las sobretensiones originadas por el rayo es tan elevada frente al valor de la tensión nominal de la línea aérea de distribución que tanto el nivel de aislamiento de los componentes de una red de distribución, como la selección y coordinación de protecciones, se realiza teniendo en cuenta el efecto de las sobretensiones atmosféricas.

La creciente preocupación por la calidad de la energía eléctrica ha creado aún más interés en las descargas atmosféricas y el mejoramiento de las protecciones contra las descargas tipo rayo de las líneas aéreas de distribución está siendo considerado como una forma de reducir el número de interrupciones momentáneas y las disminuciones de voltaje.

Aunque la mayoría de líneas de distribución no están apantalladas; es decir que no poseen cable de tierra, un pequeño porcentaje de estas líneas han sido construidas con estos tipos de cable. En este capítulo se analizará el efecto de los cables de tierra en líneas de distribución el cual podría reducir las sobretensiones inducidas por rayos a tierra que caen en las cercanías de la línea y por tanto reducir el número de contorneamientos causados por este tipo de descargas, que en algunos casos puede ser mayor que el número de contorneamientos causados por rayos directos a la línea. Si la línea está apantallada entonces también puede aparecer contorneamiento causado por rayos que impacten en el cable de tierra (a lo cual se le conoce como: cebado inverso).

## 5.1. Parámetros de una descarga atmosférica.

### 5.1.1 Definiciones.

Antes de explicar los parámetros que conforman una descarga atmosférica es necesario comprender algunas definiciones básicas:

1. **Líder descendente (Stepped Leader)<sup>[1]</sup>:** El líder descendente es un canal ionizado negativamente que avanza buscando conectar con la tierra, la cual se encuentra con polaridad positiva por inducción. Éste líder tiene una particularidad: avanza de a saltos. Cada salto suele tener una longitud de 50 a 200 m. Se cree que los saltos se deben a que el canal ionizado, a medida que penetra en el dieléctrico (aire), va disminuyendo su campo eléctrico hasta que no puede quebrarlo más.

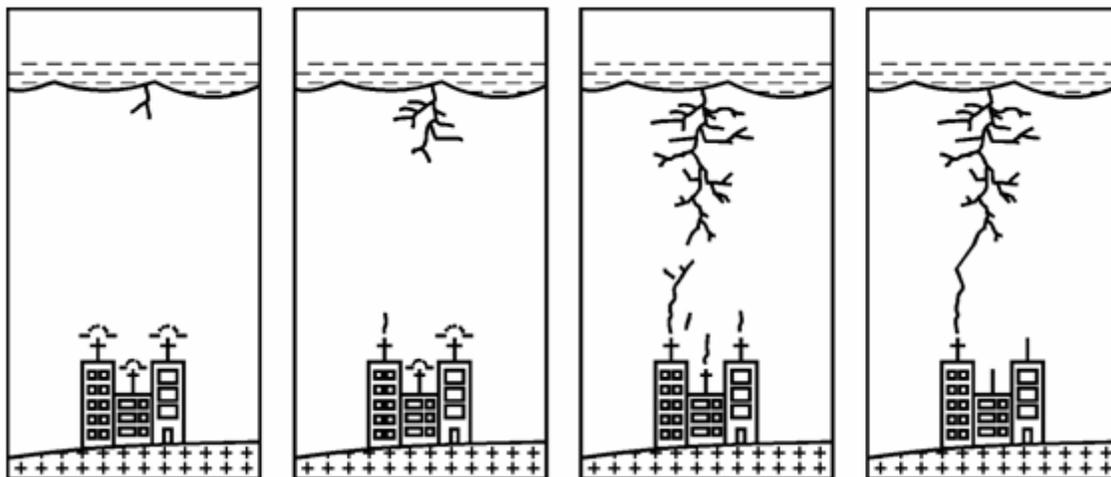


Figura 5.1. Comportamiento del líder descendente.

2. **Descarga secundaria (Dart Leader)<sup>[2]</sup>:** El impacto provocado por las cargas eléctrica que la descarga de retorno introduce en el seno de la nube es tan fuerte, que en la mayoría de los casos origina una segunda descarga orientada hacia tierra, denominada descarga

---

<sup>[1]</sup> Ver referencia [1]

<sup>[2]</sup> Ver referencia [2]

secundaria o "Dart Leader", con una velocidad promedio de 1% la de la luz.

3. **Velocidad de la descarga de retorno (Return Stroke)**<sup>[3]</sup>: La velocidad de propagación de ésta descarga es aproximadamente 10% de la velocidad de la luz, lo cual causa que sea apreciable el valor de la intensidad de corriente que puede alcanzar valores de hasta 160 kAmp.
4. **Descarga del rayo (Lightning Flash)**<sup>[4]</sup>: Se define como una descarga del rayo a tierra que continúa con una serie de descargas llamadas de retorno.

### 5.1.2. Parámetros.

Las sobretensiones inducidas en una línea aérea de distribución por descargas atmosféricas son una causa muy importante de contorneamientos, de aquí la importancia de evaluar el comportamiento de una línea frente a este tipo de sobretensiones. Para entender el efecto de dichas sobretensiones es necesario comprender el comportamiento de de las descargas. En las tablas 5.1 y 5.2 muestran datos obtenidos de diferentes fuentes sobre las características principales de los rayos.

Tabla 5.1. Parámetros de una descarga atmosférica<sup>[5]</sup>.

	<b>Valor representativo</b>	<b>Rango</b>
<b>Stepped Leader</b>		
Salto del líder	50mts.	3-200mts
Intervalo de tiempo entre saltos	50uSeg.	30-125uSeg.
Velocidad promedio de cada salto del líder	150Km/Seg.	100-2600Km/Seg.
Carga depositada en cada canal del líder descendente	5 Coulomb	3-20 Coulomb
<b>Dart Leader</b>		
Velocidad de propagación	2000Km/Seg.	1000-21,000Km/Seg.
Carga depositada en cada canal de la descarga secundaria	1 Coulomb	0.2-6 Coulomb
<b>Return Stroke</b>		
Velocidad de propagación.	80,000Km/Seg.	20,000-160,000Km/Seg.
Razón de incremento de corriente	10kA/uSeg.	1 - 80kA/uSeg.
Tiempo para la corriente de pico	2uSeg.	1 - 30 uSeg.

<sup>[3]</sup> Ver referencia [2]

<sup>[4]</sup> Ver referencia [3]

<sup>[5]</sup> Ver referencia [4]

Continuación tabla 5.1.

Pico de corriente	10kAmp.	20-110kAmp.
Tiempo para la mitad del pico de corriente	40uSeg.	10-250uSeg.
Carga trasferida	2.5 Coulomb	0.2-20 Coulomb.
Longitud del canal	5Kms.	2-14Kms.
Energía disipada.	100kJ/metro	
<b>Lightning Flash</b>		
Numero de retornos por rayo	03-Abr	Ene-26
Intervalo de tiempo entre retornos	40mSeg.	3-100mSeg.
Duración del rayo	0.2Seg.	
Carga trasferida	25 Coulomb	3-90 Coulomb

Tabla 5.2. Parámetros de una descarga atmosférica<sup>[6]</sup>.

Voltaje (relativo a tierra)	1.0 e8 – 1.0e9 Volt
Corrientes menores después del líder descendente	100 Amp.
Pico de corriente.	30 kAmp.
Duración	0.001 – 0.5 Seg. (puede ir separado por tiempos relativos de calma)
Diámetro del canal de corriente	0.1 mts.
Diámetro de la luminosidad.	1-10 mts.
Longitud típica.	5Kmts.
Electrón-Densidad	1 e23 – 1 e24 Electrones/mts <sup>3</sup>
Pico del campo magnético creado	1 Tesla

## 5.2. Introducción al comportamiento de las sobretensiones de origen atmosférico.

En los siguientes apartados se presentará un resumen de las ecuaciones que son necesarias para poder calcular las sobretensiones que aparecen en la línea debidos tanto a descargas directas como a tierra, cabe mencionar que en esta parte no se tocan los temas como son los efectos que estas sobretensiones producen en una determinada línea, sino mas bien el comportamiento que sucede en ellas. De aquí en adelante se entenderá por rayo directo al impacto bien en un conductor de fase o bien en un conductor de tierra, si la línea ha sido apantallada.

<sup>[6]</sup> Ver referencia [5]

Con ambas metodologías se han considerado únicamente líneas cuya longitud sea mucho más grande que la distancia perpendicular entre el impacto del rayo y la línea.

### 5.2.1. Análisis de las sobretensiones originadas por rayos directos<sup>[7]</sup>.

#### 5.2.1.1. Impacto en un conductor de fase.

El valor de la tensión originada por el impacto de un rayo directo en una línea de distribución es tan elevado que cualquier rayo que alcance un conductor de la línea terminará produciendo contorneamiento.

Las descargas directas sobre los conductores de fase producirán, casi con certeza, un flameo directo de las cadenas aisladoras, ocasionando una falla usualmente monofásica. El flameo inminente se puede visualizar si tenemos en cuenta que la impedancia característica de una línea de distribución, es aproximadamente  $400\Omega$  (ver ecuación 5.2), y que un rayo promedio tiene una corriente pico aproximadamente de 30 KA (ver tabla 5.1).

La figura 5.2 muestra un diagrama con el impacto de un rayo en un conductor de fase, que generalmente será el conductor situado en una posición más elevada. La corriente del rayo se dividirá en dos partes iguales que darán lugar a dos tensiones que se propagarán en ambos sentidos. La tensión máxima originada en el conductor donde impacta el rayo vendrá dada por:

$$V_{cl} = Z_c \frac{I}{2} \quad \text{Ecu. (5.1)}$$

Siendo  $Z_c$  la impedancia característica del conductor en  $\Omega$ , e  $I$  la intensidad máxima del rayo en A.

---

<sup>[7]</sup> Ver referencia [6]

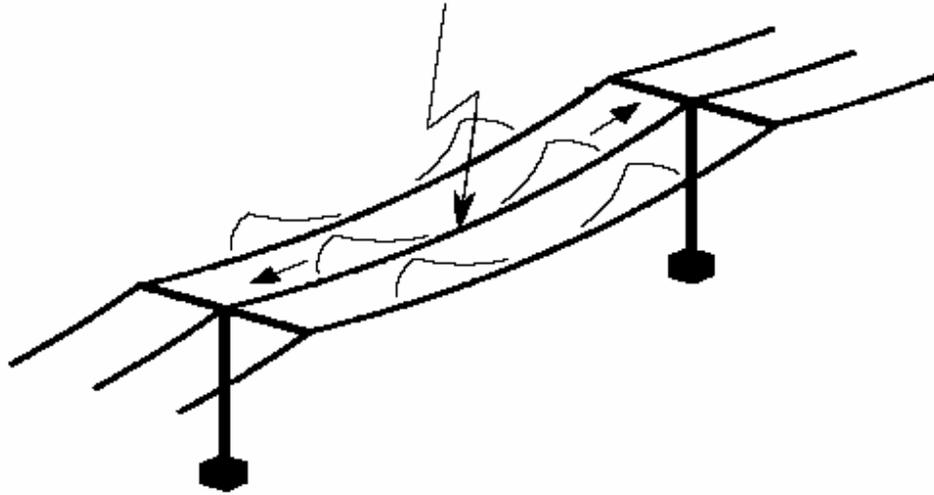


Figura 5.2. Impacto de un conductor de fase.

Además la impedancia característica de un conductor se encuentra en función de su altura media  $h$  y de su radio  $r_c$  y puede calcularse de la siguiente forma:

$$Z_c = 60 * \ln\left(\frac{2h}{r_c}\right) \quad \text{Ecu. (5.2)}$$

Ejemplo: para calcular la tensión originada por una descarga en un conductor, se consideran los siguientes datos:

$I = 30\text{Kamp.}$  (Véase tabla 5.1)

Conductor = ACSR #4

$d_c = 6.36 \text{ mm.}$  (Véase figura 5.3);  $r_c = 3.18 \text{ mm.}$

$h = 9 \text{ mts.}$  (Véase tabla 5.3).

Usando Ecu. 5.2 se obtiene:  $Z_c = 518.5\Omega$ ; sustituyendo en Ecu. 5.1:  $V_{c1} = 7777.1 \text{ kVolt.}$  El cual representa el voltaje inducido en la línea debido a la descarga atmosférica.

Calibre AWG/ kCM	Hilos de Aluminio Núm.	Diámetro nominal mm	Hilos de Acero Núm.	Diámetro nominal mm	Area nominal de la sección transversal mm <sup>2</sup>	Diámetro total nominal mm	Peso aprox. kg / km	Capacidad de conducción de corriente (1) Amperes	Carga nominal de ruptura por tensión kg	Resistencia eléctrica CD a 20°C ohm / km
8	6	1.33	1	1.33	8.67	3.99	33.60	--	342	3.42
7	6	1.50	1	1.50	10.55	4.50	42.80	--	433	2.72
6	6	1.68	1	1.68	13.30	5.04	53.70	105	540	2.15
5	6	1.89	1	1.89	16.76	5.67	68.00	120	677	1.71
4	6	2.12	1	2.12	21.15	6.36	85.50	140	846	1.35
3	6	2.38	1	2.38	26.67	7.14	107.8	160	1 044	1.08
2	6	2.67	1	2.67	33.62	8.01	135.7	185	1 292	0.853
1	6	3.00	1	3.00	42.41	9.00	171.3	210	1 618	0.674
1/0	6	3.37	1	3.37	53.48	10.11	216.2	240	1 986	0.535
2/0	6	3.78	1	3.78	67.43	11.34	272.0	275	2 398	0.424
3/0	6	4.25	1	4.25	85.01	12.75	344.3	315	2 996	0.336
4/0	6	4.77	1	4.77	107.2	14.31	433.1	360	3 776	0.267
266.8	6	5.36	7	1.79	135.2	16.07	511.1	460	4 330	0.208
266.8	18	3.09	1	3.09	135.2	15.46	430.4	450	3 123	0.213
266.8	26	2.57	7	2.00	135.2	16.30	545.4	455	5 121	0.214

Figura 5.3. Características del cable ACSR<sup>[8]</sup>.

Tabla 5.3. Altura mínima de conductores sobre el piso (metros)<sup>[9]</sup>.

Clases de piso o rieles sobre los cuales pasan los conductores	Retenidas, mensajeros, conductores de comunicación y de tierra, y de cualquier voltaje con cubierta metálica conectada a tierra	Líneas abiertas suministradoras, incluyendo las de alumbrado en serie y acometidas (voltaje de fase a tierra)		
		0 - 750	750 - 1500	1500 - 50000
		En Cruzamiento sobre		
Vías férreas	8.00	8.00	8.50	9.00
Carreteras	7.00	7.00	7.00	7.00
Calles, callejones o caminos vecinales	7.50	5.50	6.00	7.00
Lugares no transitados por vehículos	5.50	5.50	5.50	6.00
		A lo largo de		
Calles o callejones en distritos urbanos	5.50	5.50	6.00	6.50
Caminos en distritos rurales	5.50	5.50	5.50	6.00

<sup>[8]</sup> Ver referencia [7]

<sup>[9]</sup> Ver referencia [8]

En las otras fases de la línea también se originarán sobretensiones por acoplamiento. Si K es el factor de acoplamiento entre dos fases, la tensión máxima inducida en otra fase será:

$$V_{c2} = KV_{c1} = KZ_c \frac{I}{2} \quad \text{Ecu.} \quad (5.3)$$

El contorneamiento en la línea puede originarse:

- Entre conductores de fase si la diferencia de tensiones:

$$V_{c1} - V_{c2} = (1 - K)Z_c \frac{I}{2} \quad \text{Ecu.} \quad (5.4)$$

Es superior a la rigidez dieléctrica entre los conductores, En los conductores aéreos, el efecto es visible en la oscuridad, pudiéndose apreciar cómo queda envuelto por un halo luminoso, azulado, de sección transversal circular, es decir, en forma de corona, por lo que al fenómeno se le dio el nombre de efecto corona, es decir se producen pérdidas de energía debido a la corriente que se forma a través del medio.

- En la cadena de aisladores más próxima al impacto si las tensiones que se propagan desde el punto de impacto superan la tensión crítica de contorneo.

#### 5.2.1.2. Impacto en un conductor de tierra.

La figura 5.4 muestra las dos posibilidades que se pueden presentar: el rayo impacta en un conductor de tierra en un punto situado en medio del vano o justo en el poste.

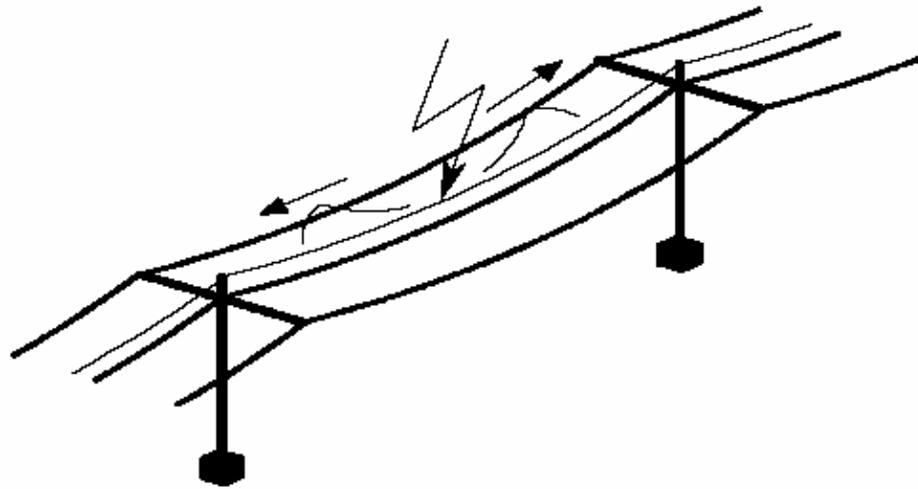
Si el impacto se produce en el conductor de tierra el análisis inicial es similar al anterior. Las tensiones originadas en este conductor y en el conductor de fase serán

$$V_{ct} = Z_{ct} \frac{I}{2} \quad \text{Ecu. (5.5)}$$

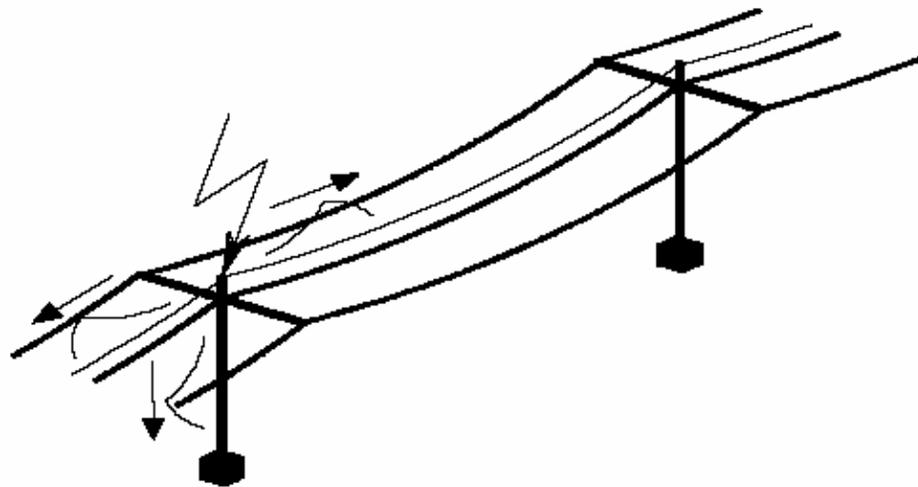
$$V_c = KV_{ct} \quad \text{Ecu. (5.6)}$$

Siendo  $Z_{ct}$  la impedancia característica del cable de tierra, y K el factor de acoplamiento entre el cable de tierra y un conductor. Este coeficiente de acoplamiento se puede obtener

a partir de la impedancia característica del cable de tierra,  $Z_{ct}$ , y a partir de la impedancia mutua entre cable de tierra y conductor,  $Z_{ct-c}$ , según la siguiente expresión:



a) En medio de un vano



b) En un poste

Figura 5.4. Impacto en un conductor de tierra.

$$K = \frac{Z_{ct-c}}{Z_{ct}}$$

Ecu. (5.7)

$$Z_{ct} = 60 * \ln\left(\frac{2h_{ct}}{r_{ct}}\right) \quad \text{Ecu. (5.8)}$$

$$Z_{ct-c} = 60 * \ln\left(\frac{D_{ct-c}}{d_{ct-c}}\right) \quad \text{Ecu. (5.9)}$$

Donde  $h_{ct}$  es la altura del cable de tierra en m,  $r_{ct}$  es el radio del cable de tierra en m,  $D_{ct-c}$  es la distancia entre la imagen del cable de tierra y el conductor en m, y  $d_{ct-c}$  es la distancia entre el cable de tierra y el conductor en m.

Si la diferencia entre las tensiones obtenidas a partir de (5.5) y (5.6) es suficientemente grande:

$$V_{ct} - V_c = (1 - K)V_{ct} \quad \text{Ecu. (5.10)}$$

Entonces el contorneamiento se producirá entre el cable de tierra y el conductor de fase en el punto de impacto. Si no es así, las ondas de tensión que se produjeron en el punto de impacto alcanzarán los postes más próximos donde se originarán ondas que viajarán a tierra. A partir de este punto el proceso será más complejo.

Si el impacto se produce directamente en el punto de conexión con el poste, la corriente del rayo se dividirá entre una parte que viajará a tierra a través del poste, y otra que se dividirá a su vez en dos partes iguales que se propagarán en ambos sentidos a través del cable de tierra, ver figura 5.4b.

El siguiente procedimiento se ha adoptado por el IEEE Working Group on Lightning Performance of Distribution Lines<sup>[10]</sup> para calcular la tensión que aparece en los aisladores como consecuencia del impacto de un rayo en el cable de tierra o en un poste, y para calcular la corriente crítica del rayo a partir de la cual se originará el contorneamiento. La figura 5.5 muestra el modelo simplificado utilizado para calcular la tensión,  $V_t$ , que aparece en la parte alta del poste, ver ecuación (5.11), obtenida para un tiempo  $t$  de subida del rayo de 2  $\mu$ s. Se tienen en cuenta las reflexiones en el apoyo adyacente.

---

<sup>[10]</sup> Ver referencia [9]

$$V_t = \frac{t}{2} \left[ Z_I - \frac{Z_W(1-\phi^N)}{1-\phi} \right] + \tau Z_W \left[ \frac{(1-\phi^N)}{(1-\phi)^2} - \frac{N\phi^N}{1-\phi} \right]$$

$$Z_W = \frac{2R_i^2 Z}{(Z+R_i)^2} \frac{(Z-R_n)}{(Z+R_n)} \quad Z_I = \frac{R_i Z}{(Z+R_i)} \quad \phi = \frac{(Z-R_i)(Z-R_n)}{(Z+R_i)(Z+R_n)}$$

Ecu. (5.11)<sup>[11]</sup>

Donde  $V_t$  es la tensión en la parte alta del apoyo en kV/kA,  $Z_{ct}$  es la impedancia característica del cable de tierra en  $\Omega$ ,  $R_i$  es la resistencia de puesta a tierra en  $\Omega$ ,  $R_n$  es la resistencia de puesta a tierra del apoyo adyacente en  $\Omega$ ,  $\tau$  es el tiempo de propagación de la onda de tensión a lo largo del vano, y  $N$  es el número de onda en el que se alcanza el instante  $t/2\tau$ .

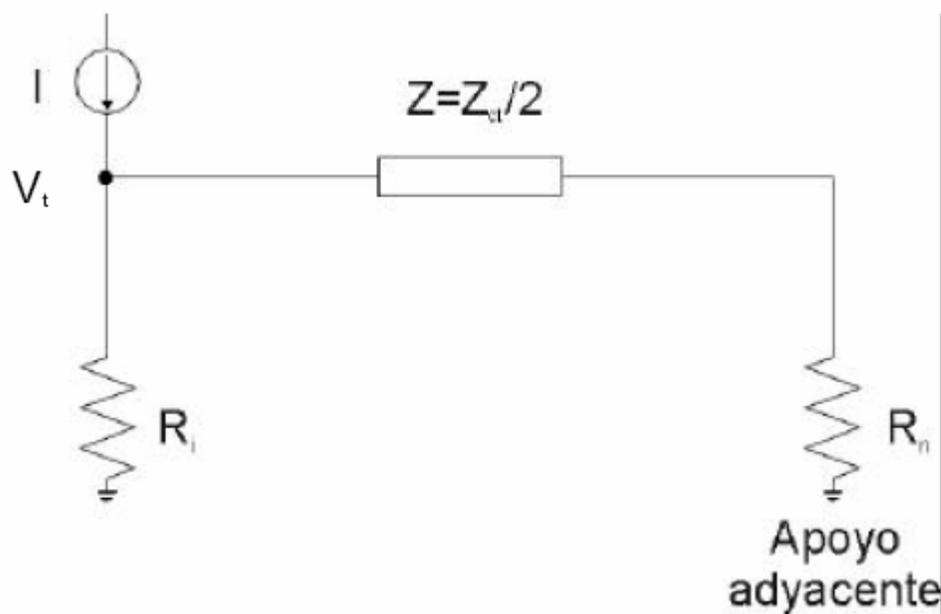


Figura 5.5. Modelo simplificado (Cebado Inversos)<sup>[12]</sup>.

La tensión que aparece en un conductor se calcula mediante la expresión:

<sup>[11]</sup> Ver referencia [10]

<sup>[12]</sup> Ver referencia [11]

$$V_c = V_t(1-K) \quad \text{Ecu. (5.12)}$$

Donde K es el factor de acoplamiento entre cable de tierra y conductor calculado según (5.7). La corriente crítica del rayo a partir de la cual se originará el contorneamiento se obtiene de la siguiente expresión:

$$I_c = \frac{V_{\max}}{V_c} \quad \text{Ecu. (5.13)}$$

Donde  $V_{\max}$  es la tensión máxima de contorneamiento que puede ser calculada a partir de la tensión crítica de contorneamiento (CFO - Critical FlashOver Voltage) según la siguiente expresión:

$$V_{\max} = 1.5 * CFO \quad \text{Ecu. (5.14)}$$

### 5.2.2. Análisis de las sobretensiones originadas por rayos a tierra.

Las descargas indirectas o a tierra son aquellas que no impactan directamente la línea, pero que retornan por un canal ionizado cercano a la línea (dentro de un radio de aproximadamente 200m). El cambio brusco del campo electromagnético producido por la circulación de la corriente de retorno induce en la línea una sobretensión.

Para este análisis se ocupara la formula de Rusck que es descrita en la Norma IEEE std. 1410-1997.

#### 5.2.2.1. Líneas monofásicas:

La expresión adoptada por Rusck para calcular la tensión inducida en una línea por descarga que cae a tierra en sus cercanías es la siguiente:

$$V_{\max} = \frac{Z_0 I_0 h}{y} \left( 1 + \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{v}{v_0} \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{1}{2} \left( \frac{v}{v_0} \right)^2}} \right) \quad \text{Ecu. (5.15)}$$

Donde "y" es la distancia perpendicular entre la descarga y la línea en m, I es la intensidad del rayo en A, h es la altura de la línea en m, v es la velocidad de retorno del rayo en m/s, c es la velocidad de la luz en el vacío en m/s, y  $Z_0$  una impedancia que se calcula a partir de la siguiente expresión:

$$Z_0 = (1/4\pi)\sqrt{(\mu_0/\epsilon_0)} = 30 \Omega$$

Ecu. (5.16)

#### 5.2.2.2. Líneas monofásicas con cable de tierra.

Cuando la descarga directa golpea el cable de guarda o la torre, se presentan varios fenómenos, la onda electromagnética producida por la descarga viaja a lo largo del conductor de guarda, e induce, debido al acople inductivo y capacitivo con los conductores de fase, una sobretensión en estos últimos que puede causar un flameo fase-tierra, ver figura 5.4.

La tensión inducida en un conductor de fase, debido a descargas que caen a tierra en las cercanías de la línea, se ve reducida por la presencia de un cable puesto a tierra a través de los postes, este precepto se verificará en este capítulo. En este caso, el cable de tierra tiene el mismo efecto tanto si se coloca por encima como por debajo del conductor de fase. Analizando el efecto de un cable de tierra, Rusck asume que si un cable es puesto a tierra a través de una resistencia R, la intensidad que circula a través de dicha resistencia vendrá dada por la expresión:

$$I = \frac{V_{ct}}{\frac{Z_{ct}}{2} + R}$$

Ecu.

(5.17)

Donde  $V_{ct}$  es la tensión inducida en kV en el cable de tierra debida a descargas a tierra, y  $Z_{ct}$  es la impedancia característica de dicho cable de tierra en W.

La tensión inducida en el conductor de fase por esta intensidad será:

$$\Delta V_c = -\frac{Z_{ct-c}}{Z_{ct} + 2R} V_{ct}$$

Ecu. (5.18)

Donde  $Z_{ct-c}$  es la impedancia mutua entre el cable de tierra y el conductor en  $\Omega$ .

La tensión inducida resultante en el conductor de fase será:

$$V'_c = V_c + \Delta V_c = V_c - \frac{Z_{ct-c}}{Z_{ct} + 2R} V_{ct}$$

Ecu.

(5.19)

Puesto que la tensión inducida es directamente proporcional a la altura, el factor de protección o de apantallamiento vendrá dado por la expresión:

$$pr = 1 - \frac{h_{ct}}{h_c} \cdot \frac{Z_{ct-c}}{Z_{ct} + 2R}$$

Ecu.

(5.20)

La tensión inducida en el conductor teniendo en cuenta la presencia de un cable de tierra se calculará según la siguiente expresión:

$$V' = pr \cdot V$$

Ecu. (5.21)

Donde  $V$  es la tensión inducida cuando no hay cable de tierra, ver expresión (5.15), y  $pr$  el factor de apantallamiento del cable de tierra (Factor de corrección a causa de la atenuación de la radiación).

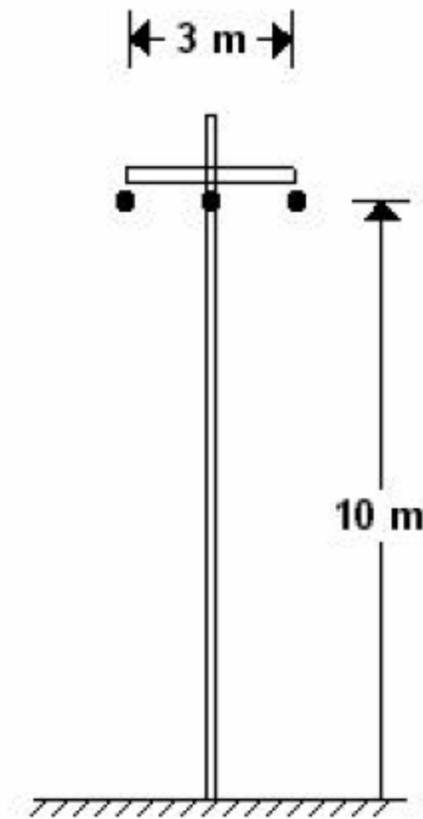
### 5.2.3. Análisis paramétrico.

En esta sección se ha incluido un estudio paramétrico en el que se analiza la influencia que pueden tener algunos parámetros del rayo en las sobretensiones que se originan en una línea aérea de distribución; los cálculos se han hecho usando MATLAB 6.5.

#### 5.2.3.1. Estudio paramétrico en líneas sin cable de tierra.

En esta parte se estudiarán los efectos de los parámetros más importantes que intervienen en el cálculo de sobretensiones originadas por rayos, tanto directas a la línea como a tierra.

En la figura 5.6 se muestra la configuración de los conductores que se analizarán.



Otros datos de interés:

Radio de los conductores = 10mm.  
Longitud media de un vano = 30mts.

De la tabla 5.1, se pueden tomar los datos siguientes:

Velocidad de retorno del rayo = 90000km/seg.

Intensidad de la descarga = 10kAmp.

Figura 5.6. Configuración de la línea.

Según la ecuación B.3. de la norma IEEE std. 1410-1997. con la que se puede calcular la distancia mínima,  $y_{min}$ , por debajo de la cual un rayo impactará directamente en la línea. En la figura 5.7 se muestra su aplicación en líneas sin apantallar. En este caso, aplicando este modelo y suponiendo una caída vertical, un rayo de intensidad de pico  $I$  alcanzará el conductor de fase si su trayectoria final cae a la izquierda del punto de intersección "A", y la paralela situada a una altura  $\beta \cdot r_s$  sobre tierra:

$$r_s = \alpha \cdot I^\gamma$$

Ecu. (5.22)

El calculo de la distancia mínima,  $y_{min}$ , se obtiene a partir de la siguiente expresión:

$$y_{\min} = \sqrt{r_s^2 - (\beta \cdot r_s - h)^2} \quad \text{para } \beta \cdot r_s > h$$

$$y_{\min} = r_s \quad \text{para } \beta \cdot r_s \leq h$$

(5.23)

Ecu.

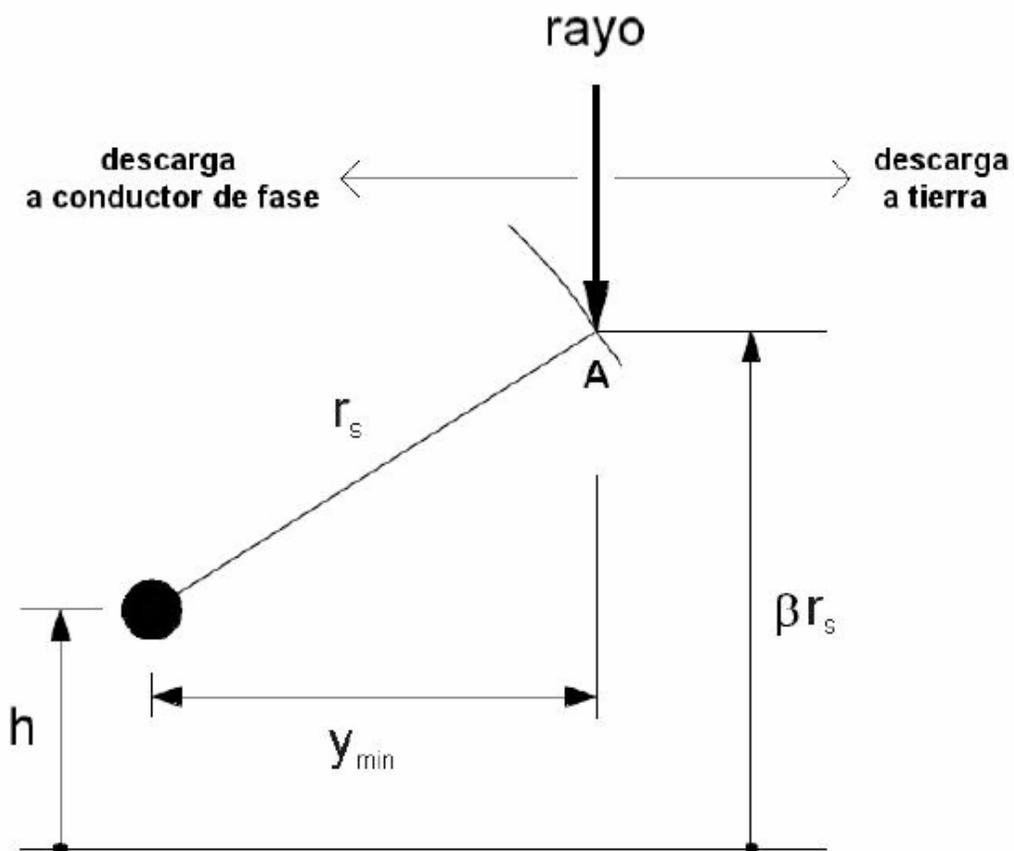


Figura 5.7. Modelos electrogeométrico (línea sin apantallar)

Haciendo referencia a la figura B.1 y a la ecuación B.3 de la norma IEEE std. 1410-1997, se puede encontrar:

$$y_{\min} = \sqrt{r_s^2 - (r_g - h)^2}$$

(5.24)

Ecu.

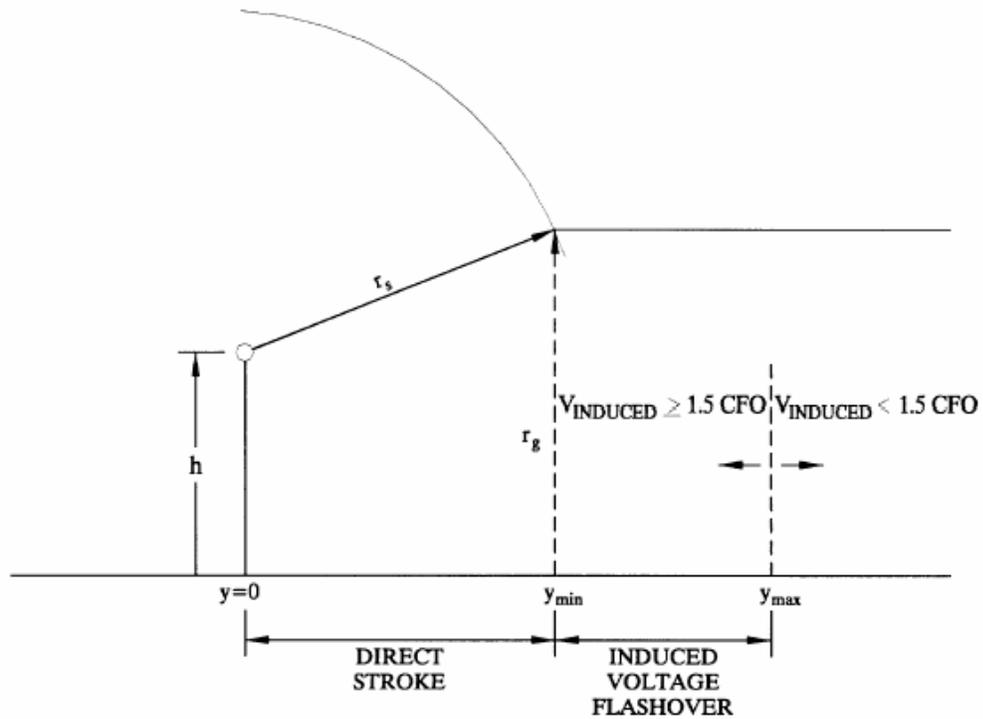


Figura 5.8. Uso del modelo electrogeométrico y modelo de Rusck.

$$r_s = 10 \cdot I_0^{0.65}$$

$$r_g = 0.9r_s$$

(5.25) <sup>[13]</sup>

Ecu.

Donde  $I_0$  es la corriente pico de la descarga atmosférica,  $r_s$  es la distancia del impacto al conductor,  $r_g$  es la distancia del impacto a tierra; ambas distancias están en metros.

Con esto se puede observar que para la ecuación 5.23, las constantes tienen los siguientes valores:

$$\beta = 0.9, \quad \alpha = 10, \quad \gamma = 0.65.$$

La figura 5.9 muestra el comportamiento de la distancia mínima usando la ecuación 5.23. La altura de donde están ubicados los cables es de 10 mts. A partir de esta figura se pueden deducir para este caso concreto qué impactos irán a

<sup>[13]</sup> Ver referencia [12]

parar a la línea y cuáles irán a parar a tierra dependiendo de la intensidad máxima de la descarga y de la distancia perpendicular entre descarga y línea.

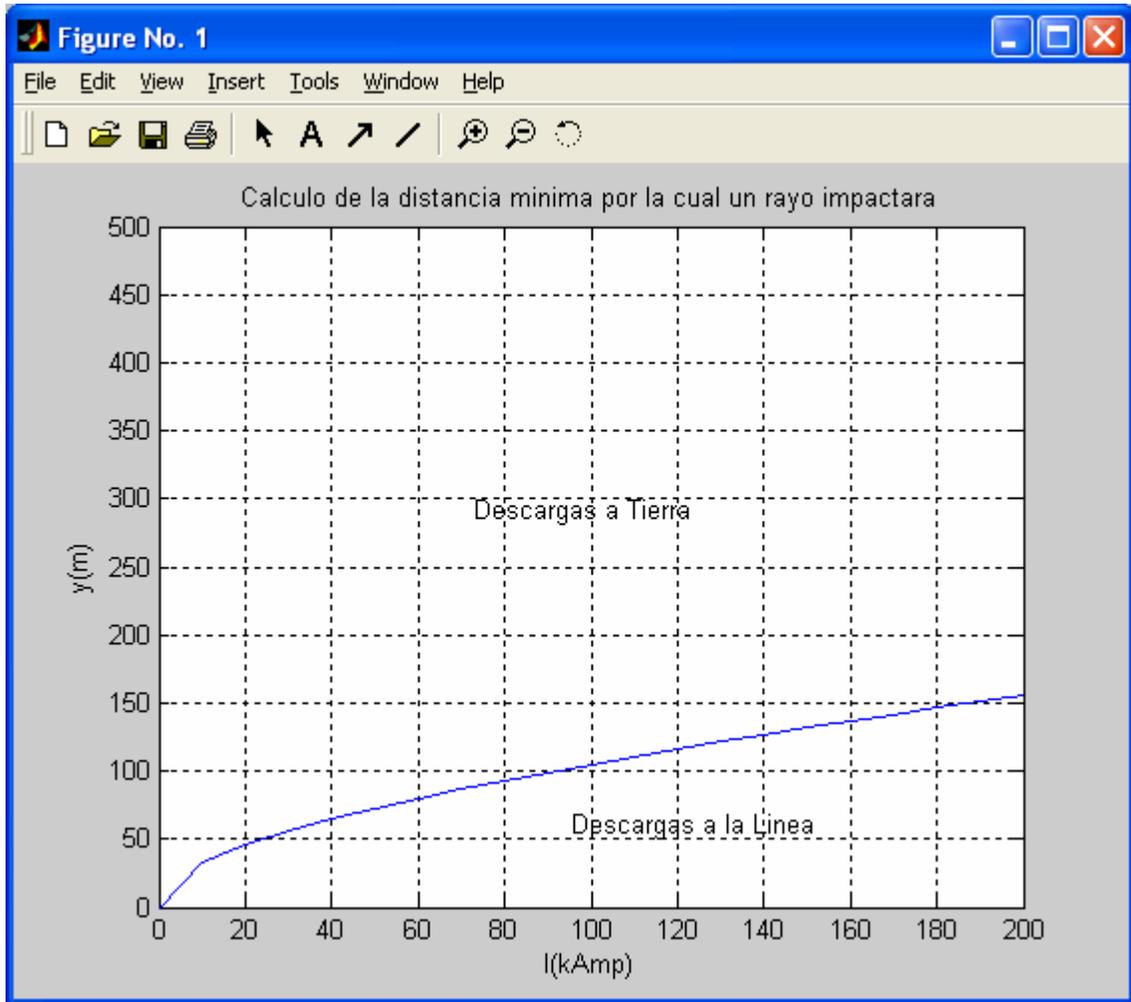


Figura 5.9. Modelo electrogeométrico, línea sin apantallar.

a) Influencia de la distancia perpendicular entre línea y descarga:

Para este caso se ha usado la ecuación 5.15, en donde se ha mantenido constantes:

$I=10\text{kAmp.}$

$v=90000\text{kms/seg.}$

En la figura 5.10, Se ha variado de 0 a 500 m la distancia entre el punto de impacto y la línea. Es importante tener en cuenta que a distancias mayores de 200 m la descarga siempre caerá a tierra sea cual sea el valor de su intensidad. Por tanto, se supone que el valor de la sobretensión inducida por una descarga que cae a tierra a una distancia mayor de 500 m es tan pequeño que no se producirá contorneamiento en ninguna línea.

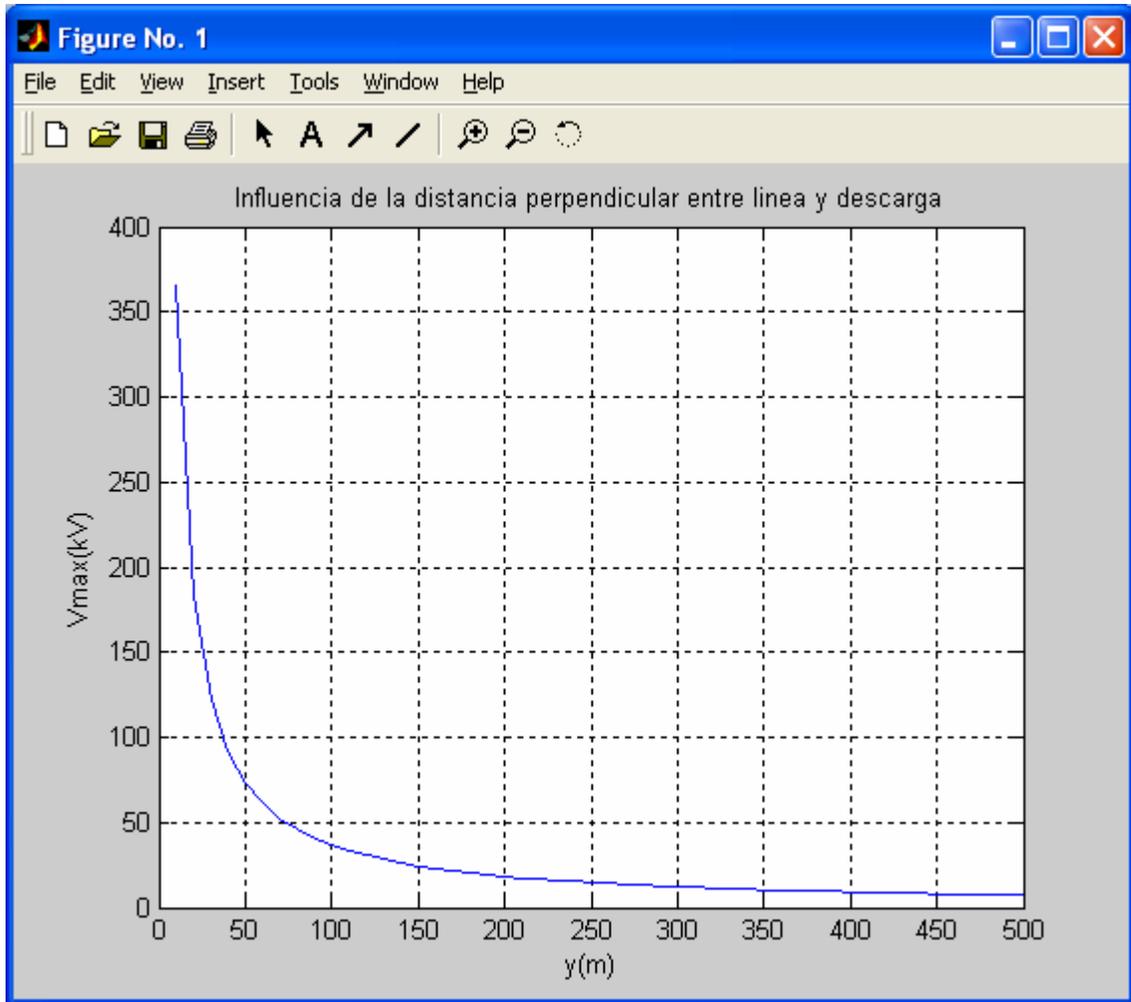


Figura 5.10. Influencia de  $y$  (descargas a tierra).

La figura 5.10 muestra como varía la tensión que aparece en la línea en función del punto de impacto de la descarga. El valor de la tensión por descargas directas es constante mientras no se supere la distancia mínima,  $y_{min}$ . A partir de este punto la tensión que aparece en la línea es debida a descargas que caen a tierra. Se puede observar que el valor

de la tensión inducida cuando una descarga cae a una distancia superior a 500 m es muy pequeño.

**b) Influencia de la intensidad de la descarga:**

En este caso se ha mantenido constantes en la ecuación 5.15 los valores de:

$y=100$  mts. (Distancia perpendicular entre la descarga y la línea)

$v=90000$  kms.

Se ha variado la intensidad máxima de la descarga entre 1 y 200 kAmp.

En la figura 5.11 se puede ver claramente la evolución de la tensión originada por descargas a tierra y su comportamiento con respecto a los voltajes inducidos en las líneas.

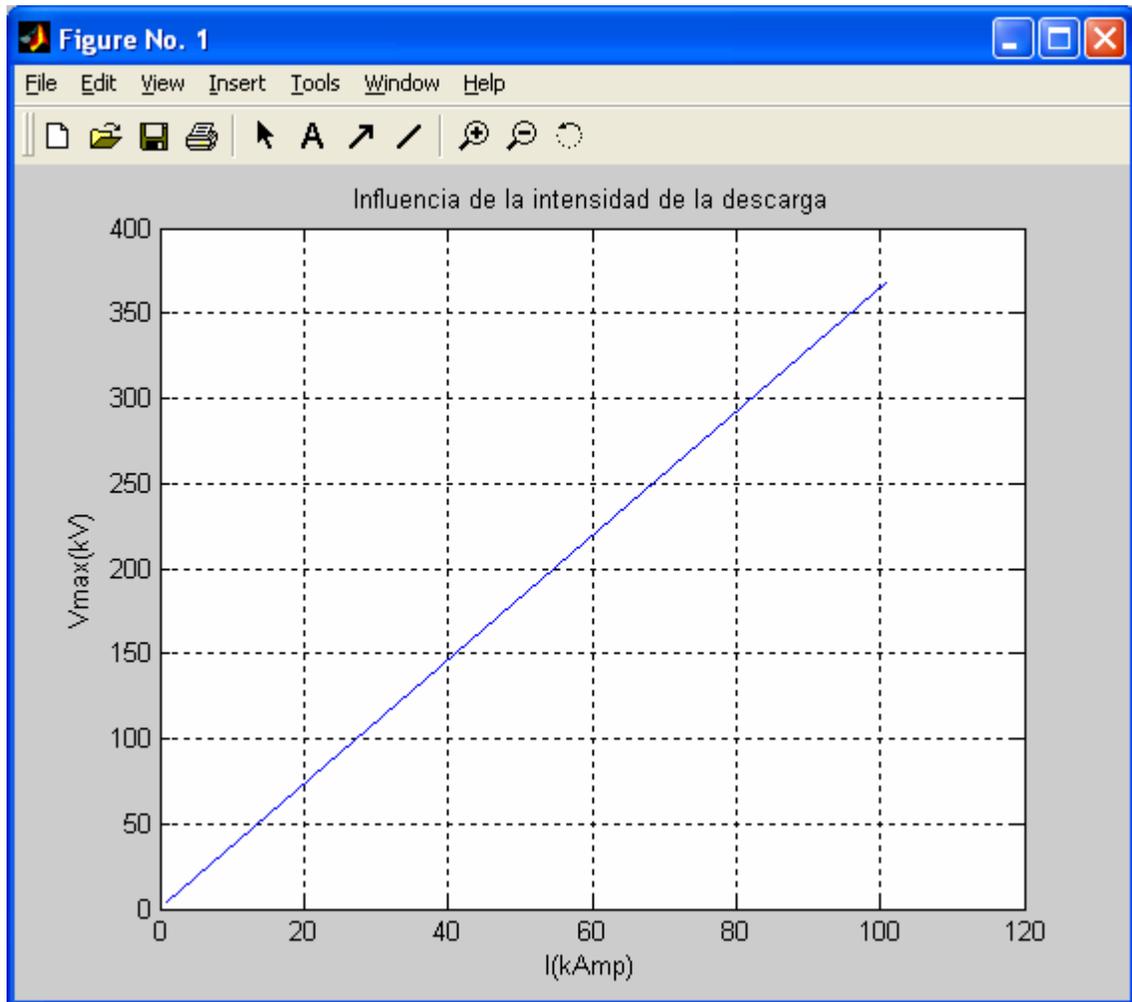
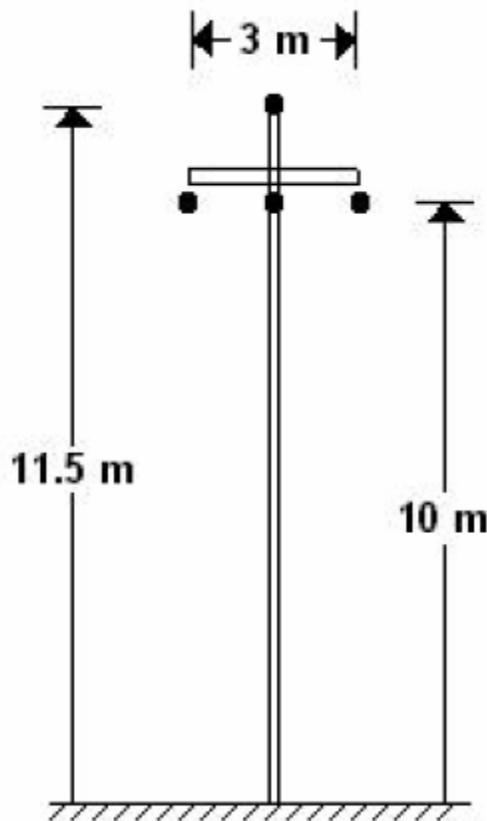


Figura 5.11. Influencia de la corriente (descargas a tierra)

### 5.2.3.2. Estudio paramétrico en líneas con cable de tierra.

En esta parte se estudiarán los efectos de los parámetros más importantes que intervienen en el cálculo de sobretensiones originadas por rayos directos a la línea, conductores o cable de tierra, y directos a tierra. La figura 5.12 muestra la configuración de los conductores de la línea empleada en este estudio.



Datos de interés:

Radio de los conductores de fase=10 mm.

Radio del cable de tierra=5 mm.  
Resistencia de puesta a tierra=50Ω

Longitud media de un vano=30 mts.

Figura 5.12. Configuración de la línea.

A partir de las ecuaciones 5.8 y 5.9 se pueden calcular:  $Z_{ct}$  y  $Z_{ct-c}$ :

De la figura 5.12 podemos calcular la distancia entre la imagen del cable de tierra y el conductor ( $D_{ct-c}$ ), el cual será:  $11.5\text{m} + 10\text{m} = 21.5\text{m}$ , además  $D_{ct} = 11.5\text{m} - 10\text{m} = 1.5\text{m}$ .

La imagen del cable de tierra consiste en crear un plano o eje central y reflejar la distancia del conductor de forma inversa, ver figura 5.13.

Con esto se tienen los siguientes resultados:

$$Z_{ct} = 464.44\Omega \text{ y } Z_{ct-c} = 159.76\Omega$$

Con estos valores y de la ecuación 5.20 podemos encontrar que:  $p_r = 0.6745$

A partir de este dato:  $V' = 0.6745 * V$  (ver Ecu. 5.21)

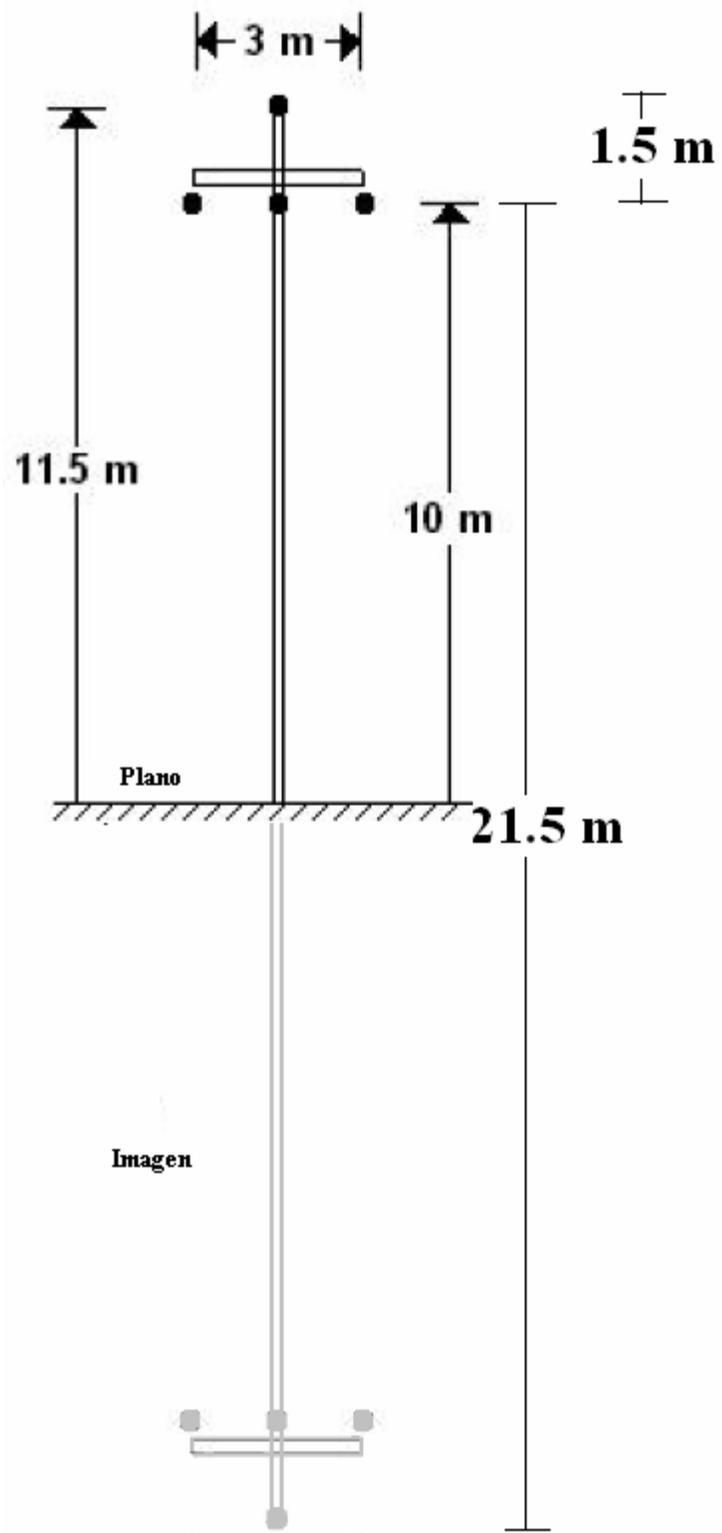


Figura 5.13. Representación de la Imagen del cable de tierra.

a) Influencia de la distancia perpendicular entre línea y descarga.

En este estudio se han mantenido constantes los siguientes valores en la ecuación 5.21:

$I=10\text{kAmps.}$

$v=90000\text{km/seg.}$

La distancia perpendicular entre descarga y línea se ha variado entre 0 m y 500 m. A partir de este punto la tensión que aparece en la línea es debida a descargas que caen a tierra. La figura 5.14 muestra solamente la parte de gráfico debido a descargas a tierra.

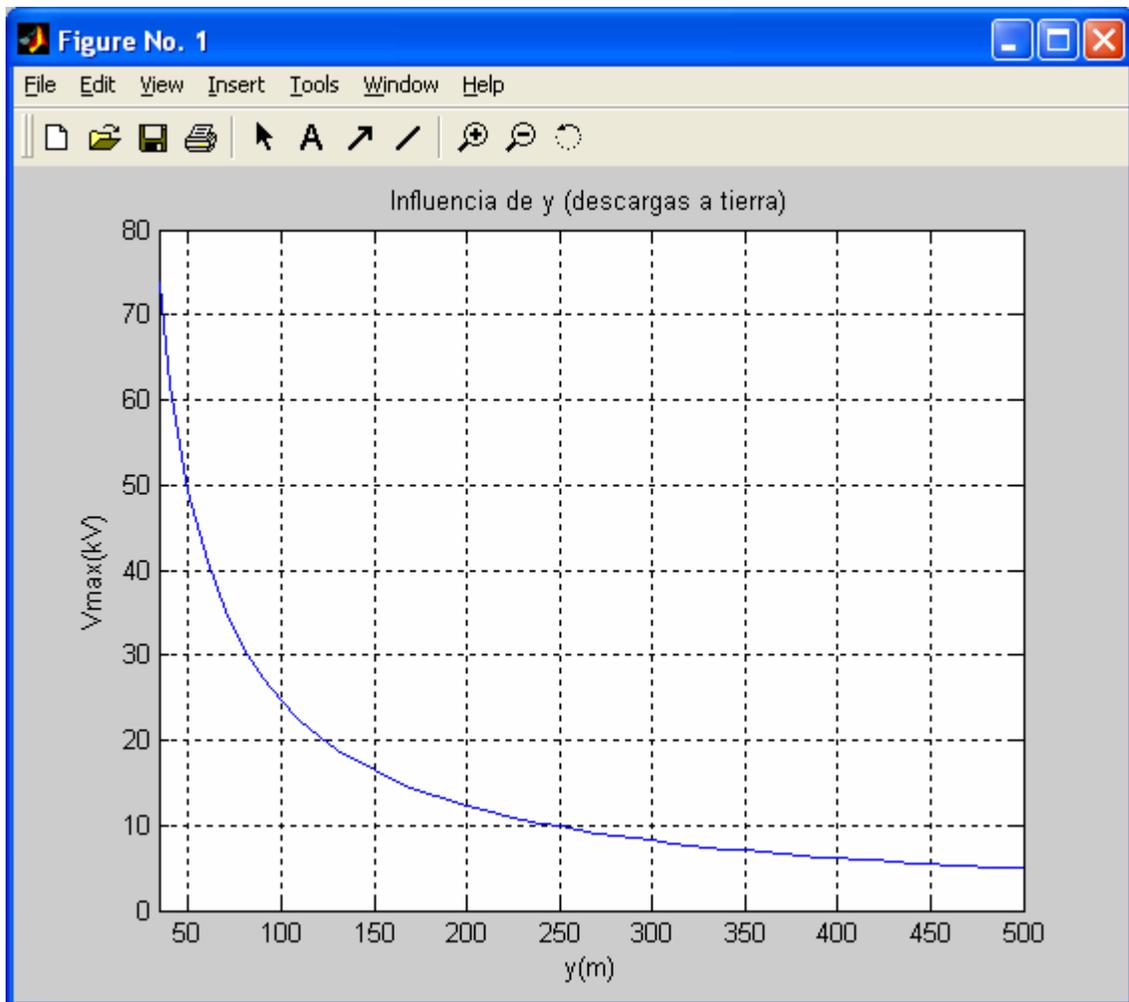


Figura 5.14. Influencia de y (descargas a tierra)

b) Influencia de la intensidad de descarga.

En este estudio se han mantenido los siguientes parámetros constantes en la ecuación 5.21:

$y=100\text{m}$

$v=90000\text{km/seg.}$

La intensidad de la descarga se ha variado entre 1 kA y 200 kA. La figura 5.15 muestra solamente la parte de gráfico debido a descargas a tierra.

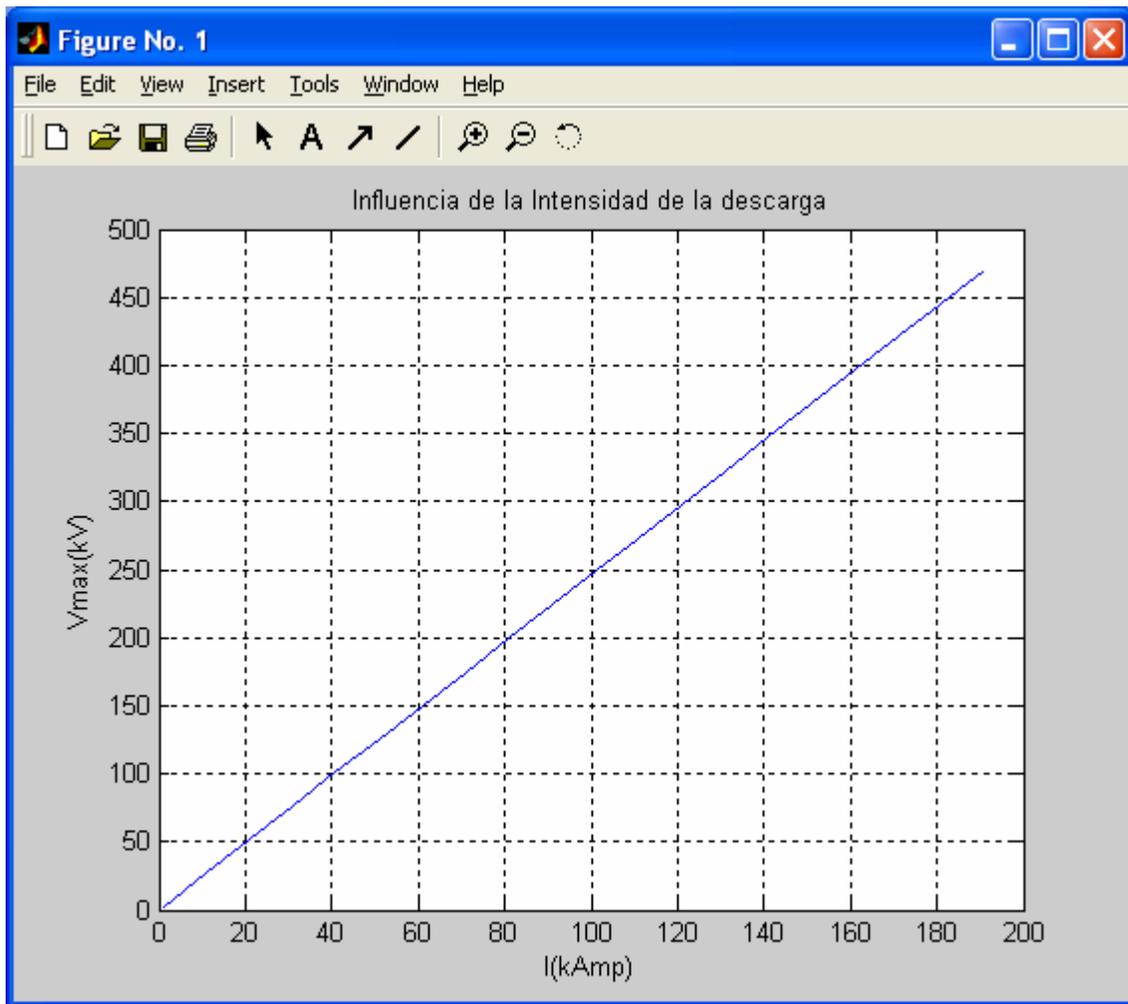


Figura 5.15. Influencia de I (descargas a tierra)

### 5.3. Análisis usando el generador de impulsos.

En esta parte se analizará el comportamiento de los elementos de una línea de distribución ante el generador de impulso, para esta parte se comparara los resultados de simulación con los obtenidos en el laboratorio.

El modelo del generador que se ocupará se detalló en el capítulo 3, el cual se muestra en la figura 5.16. Cabe mencionar que por cuestiones prácticas, la simulación parte desde que los capacitores se han cargado con el voltaje que desde el panel de control se especifica, para tal caso el generador que se simula no muestra el circuito del transformador elevador que hace que se carguen cada capacitor. Por otra parte los espinterómetros se han simulado como switch que se cierran en  $t=0$  seg.

Se ha ocupado la versión 3.7 del ATPDraw, el cual es la versión grafica del programa ATP (Alternative Transient Program).

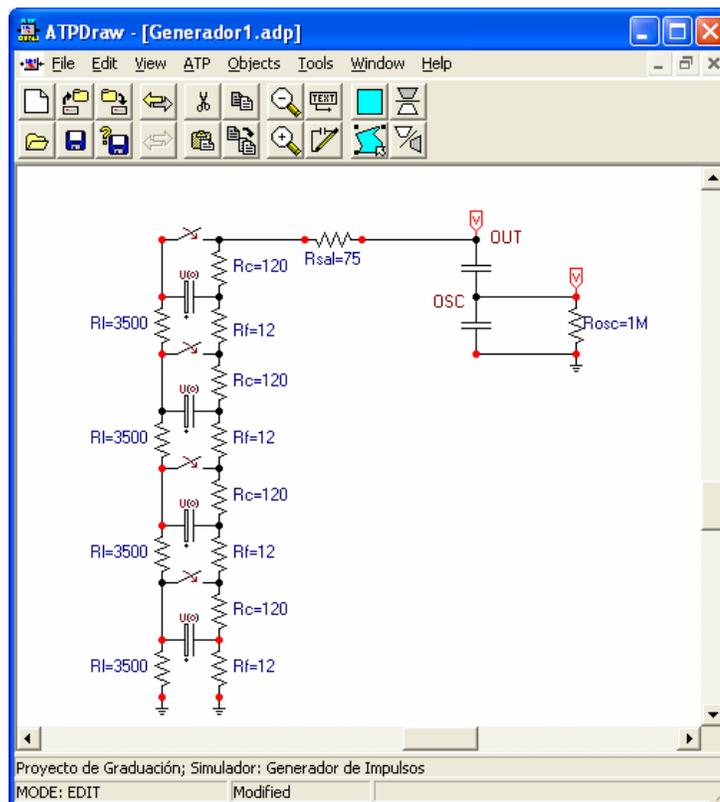


Figura 5.16. Equivalente del circuito que comprende al generador de Impulso.

El circuito de la figura 5.16 se compone de: las resistencias de frente (Rf), de cola (Rc), de carga (Rl), los espinterómetros (switch), resistencia de salida (Rsal), el divisor capacitivo, la resistencia de salida del osciloscopio (Rosc)<sup>[14]</sup> que para nuestro caso es de 1MΩ.

El listado siguiente es el que conforma el circuito que será evaluado por el ATP:

```

BEGIN NEW DATA CASE
C -----
C Generated by ATPDRAW Noviembre, Lunes 15, 2004
C A Bonneville Power Administration program
C Programmed by H. K. Høidalen at SEFAS - NORWAY 1994-2002
C -----
C Proyecto de Graduación;
C Simulador:
C Generador de Impulsos
C dT << Tmax << Xopt << Copt >
  1.E-8 6.E-5
  25000 1 0 0 1 0 0 1 0
C 1 2 3 4 5 6 7 8
C 34567890123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890
/BRANCH
C < n 1 << n 2 << ref1 << ref2 << R << L << C >
C < n 1 << n 2 << ref1 << ref2 << R << A << B << Leng >>>>0
XX0001N5 .5 0
N7 N8 .5 0
N1 3500. 0
XX0008 12. 0
XX0008N3 120. 0
N3 N5 12. 0
XX0015N11 .5 0
XX0001N7 3500. 0
N1 XX0001 3500. 0
N5 N6 120. 0
N6 N8 12. 0
N8 N9 120. 0
N7 XX0015 3500. 0
N9 N11 12. 0
N1 XX0008 .5 0
N11 N12 120. 0
N12 OUT 75. 0
OSC OUT .00416 0
OSC .977 0
OSC 1.E6 0
/SWITCH
C < n 1 << n 2 << Tclose << Top/Tde << Ie << Vf/CLOP << type >
N1 N3 .001 1. 0
XX0001N6 .001 0
N7 N9 .001 0
XX0015N12 .001 0

```

<sup>[14]</sup> Ver referencia [13]

```

/SOURCE
C < n 1><< Ampl. >< Freq. ><Phase/T0>< A1 >< T1 >< TSTART >< TSTOP >
/INITIAL
2XX0001      1.E5
2N7          1.E5
2XX0015      1.E5
2N1          1.E5
3XX0001N5           1.E5
3N7 N8          1.E5
3XX0015N11         1.E5
3N1 XX0008        1.E5
/OUTPUT
OUT OSC
BLANK BRANCH
BLANK SWITCH
BLANK SOURCE
BLANK INITIAL
BLANK OUTPUT
BLANK PLOT
BEGIN NEW DATA CASE
BLANK

```

En la figura 5.17 se observa la salida cuando se carga cada capacitor a 30 kV, obteniendo una salida equivalente a la suma de la carga de cada capacitor.

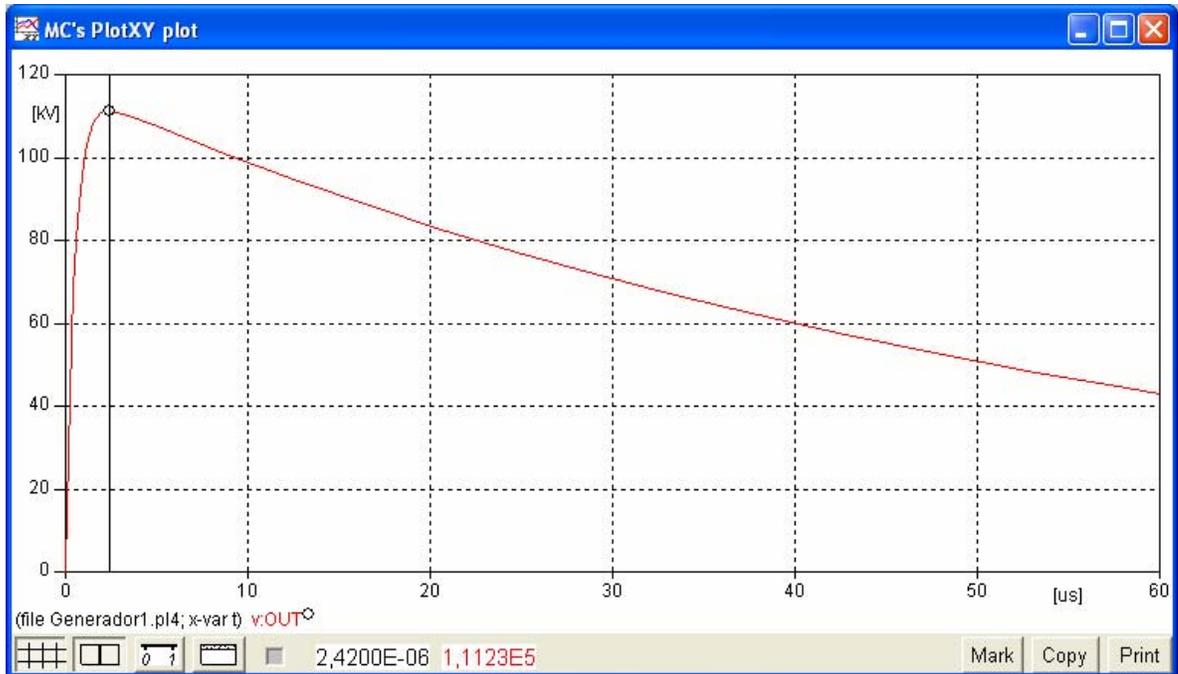


Figura 5.17. Voltaje de salida cuando se carga cada capacitor con 30 kV.

La figura 5.18 muestra la corriente de impulso producida por el generador.

La figura 5.17 muestra con claridad la onda típica de una descarga atmosférica, tal como se presento en capítulos anteriores.

A la salida del generador se coloca un divisor capacitivo que se encarga de reducir el voltaje para poder ser observado en el osciloscopio, esta ganancia de reducción es de  $4.23 \times 10^{-3}$  el comportamiento se verifica en la figura 5.19.

La tabla 5.4 muestra algunos datos que se han obtenido con esta simulación.

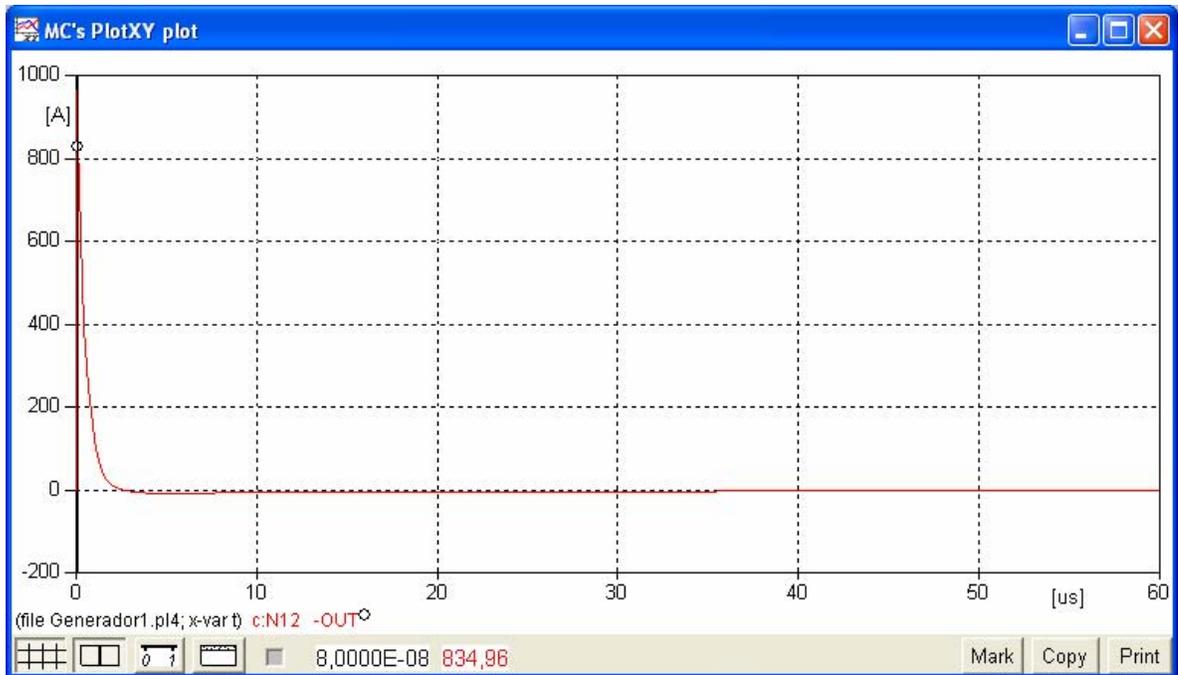


Figura 5.18. Comportamiento de la corriente de impulso cuando el voltaje de carga es 30 kV.

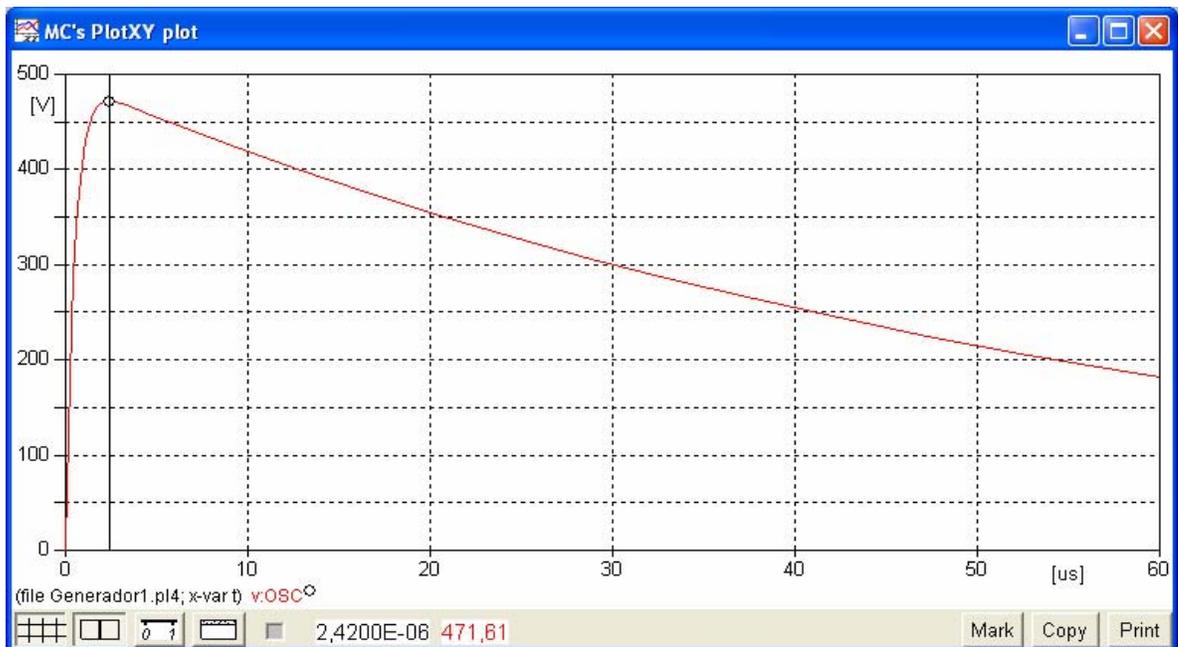


Figura 5.19. Voltaje de salida en el divisor capacitivo.

Tabla 5.4. Valores obtenidos para varias pruebas.

Prueba realizada sin ocupar objetos bajo prueba					
Vcarga (kV)	Vout (kV)	Vosc (Volt)	Tpico (uSeg)	Iimpulso (Amp)	Ganancia (x10e-3) G=Vosc/Vout
30.00	112.25	475.93	2.4716	974.31	4.2399
35.00	130.94	555.15	2.4857	1,136.30	4.2397
40.00	149.62	634.37	2.5000	1,298.80	4.2399
45.00	168.31	713.60	2.5286	1,461.00	4.2398
50.00	187.00	792.84	2.4714	1,623.30	4.2398
55.00	205.68	872.05	2.5000	1,785.50	4.2398
60.00	224.37	951.28	2.4964	1,947.80	4.2398
65.00	243.06	1,030.50	2.4677	2,110.00	4.2397
70.00	261.74	1,109.70	2.4964	2,272.30	4.2397
75.00	280.42	1,188.90	2.5108	2,434.50	4.2397
80.00	299.10	1,268.10	2.5251	2,596.80	4.2397
85.00	317.80	1,347.40	2.4964	2,759.00	4.2398
90.00	327.18	1,387.20	2.4964	2,921.30	4.2399
95.00	355.18	1,505.90	2.4677	3,083.50	4.2398
100.00	373.86	1,585.10	2.4821	3,245.80	4.2398

### 5.3.1. Simulación de un elemento de prueba.

Para este caso y según el capítulo 4, el elemento que se probara es un aislador tipo pin o de tensión, asimismo la resistencia de salida se reduce de acuerdo a como se vio en el capítulo 3. Según las tablas en el capítulo 4 sobre las características de los aisladores se encuentra que para un aislador tipo pin y nivel de voltaje de 23kV el voltaje crítico de flameo para una polaridad positiva es de 75kV.

La figura 5.20 muestra el equivalente para hacer las pruebas a un determinado elemento. Los elementos conectados juntos para la prueba de impulso se pueden subdividir físicamente en tres circuitos como se indica en la figura 5.20:

- Circuito principal que comprende el generador de impulso y el objeto en prueba (transformador, aislador, etc.)
- Circuito para la medida de las tensiones, el cual comprende el divisor capacitivo.
- Circuito de truncamiento (si son previstas pruebas de onda truncada o recortada)

La tabla 5.5 detalla el significado de cada parámetro en el circuito.

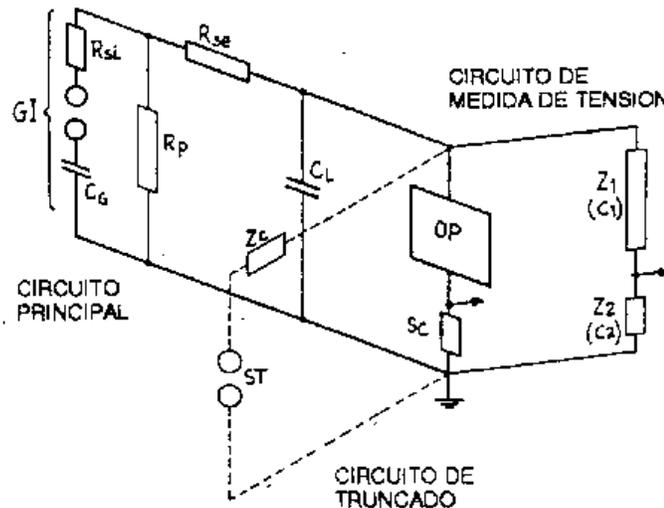


Figura 5.20. Equivalente del generador para hacer pruebas de impulso<sup>[15]</sup>.

<sup>[15]</sup> Ver referencia [14]

Tabla 5.5. Detalle de los parámetros en la figura 5.20.

GI	generador de impulsos
CG	capacidad del generador
CL	capacidad de carga
CT	capacidad equivalente del objeto en prueba
LT	inductancia equivalente del objeto en prueba
Rsi	resistencia serie interna
Rse	resistencia serie externa
Rp	resistencia en paralelo
SC	shunt para la medida de la corriente
ST	espinterómetro de corte
OP	objeto en prueba
Z1, Z2	divisores de tensión
Zc	impedancia adicional del circuito de corte

La figura 5.21 muestra el circuito que será utilizado para simular las pruebas de los elementos usando el ATPDraw<sup>[16]</sup>. Por cuestiones practicas el espinterómetro de flameo se modelará por medio de un switch; con la diferencia que el tiempo de cierre será de 1 $\mu$ Seg. Esto con el objeto de poder mostrar el valor de las corrientes de retorno que se medirán en el shunt. Ya que si se cierra al mismo tiempo que los explosores del generador no se podrá observar ningún efecto en la simulación, debido a que el programa interpretará que el nodo de salida esta a cero voltaje.

En el capítulo 4 se da una mejor explicación del shunt y sus valores que puede adoptar. Para este caso se ocupará un shunt de 0.01 $\Omega$ .

---

<sup>[16]</sup> Ver referencia [15]

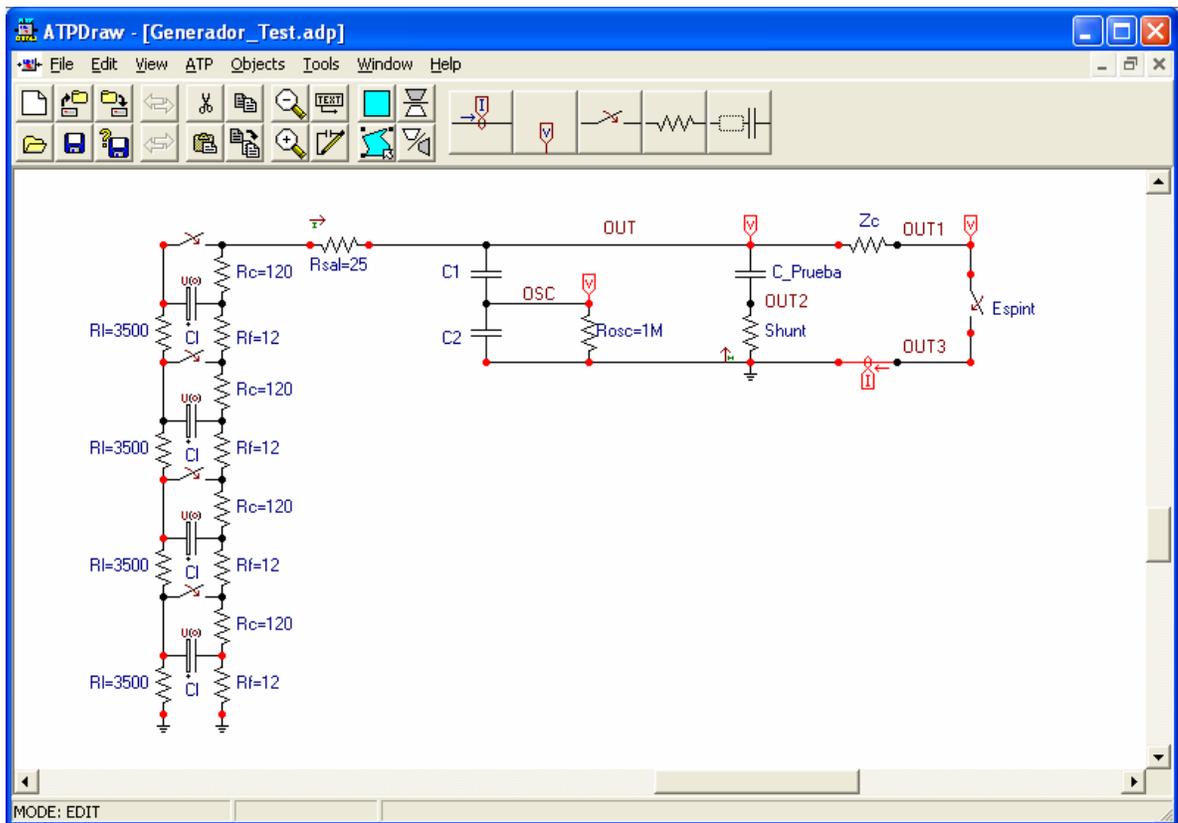


Figura 5.21. Circuito utilizado para hacer pruebas de impulso.

Los resultados son los siguientes:

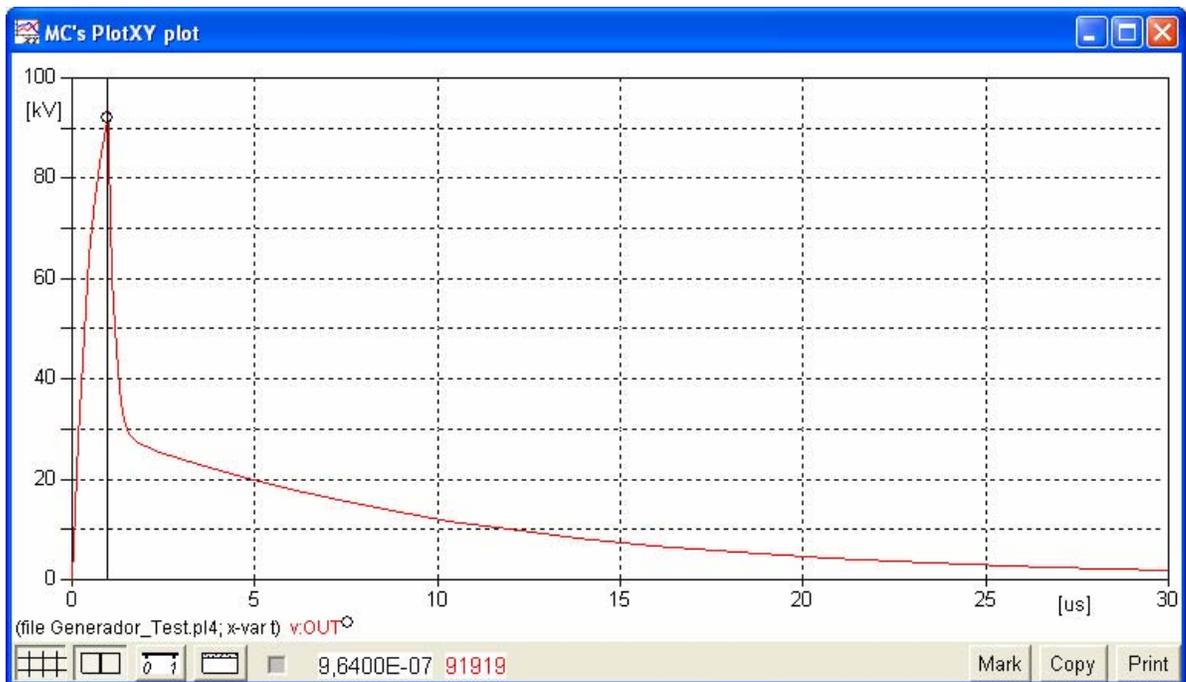


Figura 5.22. Voltaje de salida.

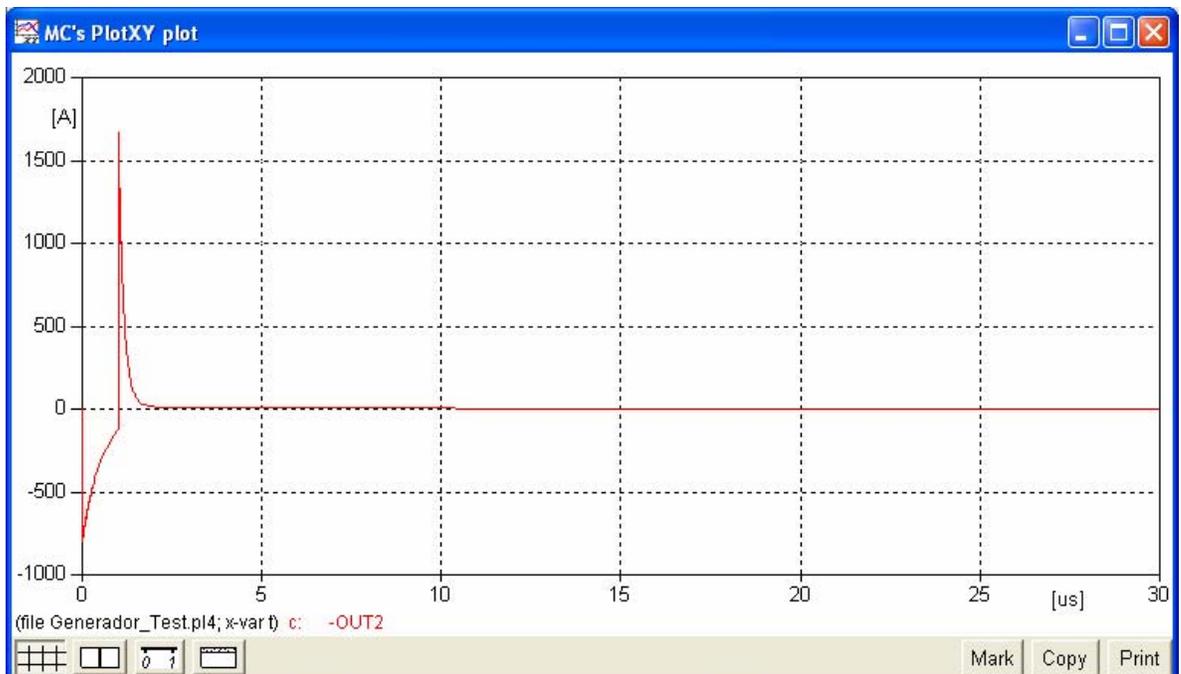


Figura 5.23. Corriente en el Shunt.

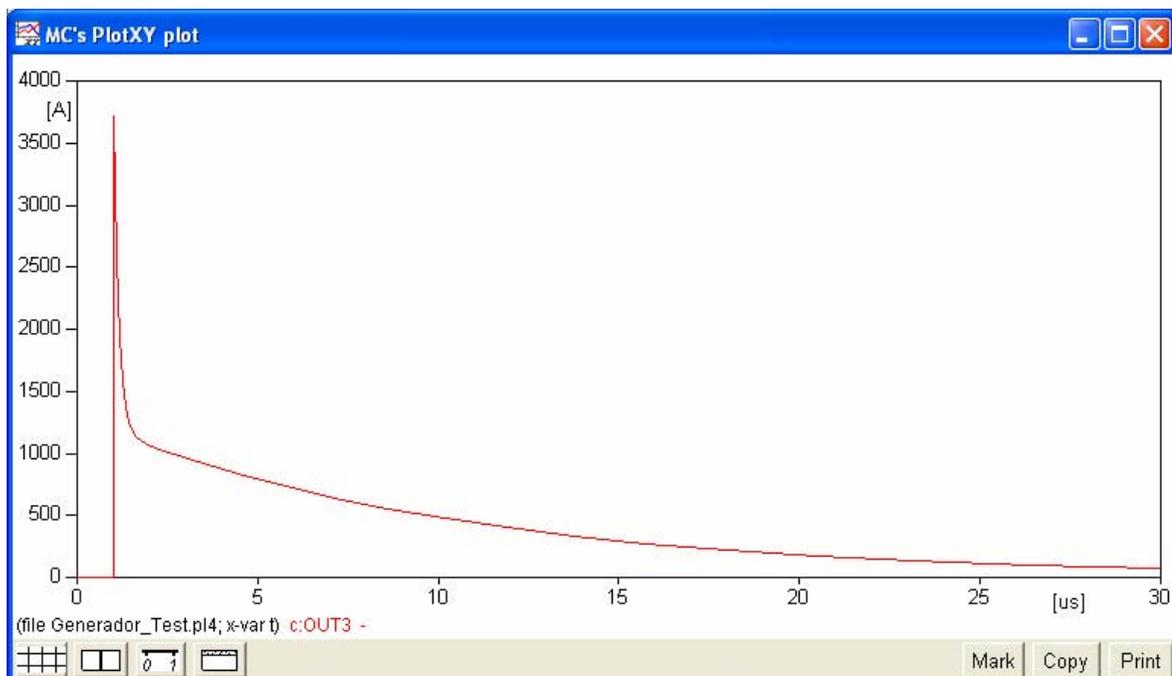


Figura 5.24. Corriente de retorno en el cable de tierra.

#### 5.4. Análisis de sobretensiones en líneas de distribución.

En esta parte se analizarán los efectos que los diferentes tipos de sobretensiones producen en las líneas de distribución.

El cálculo de sobretensiones de origen atmosférico, y por tanto la evolución del comportamiento de líneas aéreas frente al rayo, puede realizarse con cierta precisión mediante simulación digital y el empleo de modelos matemáticos rigurosos para todos los componentes.

##### 5.4.1. Consideraciones sobre el comportamiento de las líneas de distribución ante descargas atmosféricas<sup>[17]</sup>.

Las descargas atmosféricas en líneas de distribución son mucho más críticas que en líneas de transmisión, debido a que su nivel de aislamiento es mucho menor. Los daños causados por descargas atmosféricas en líneas de distribución, son debidos a descargas directas sobre los conductores de fase o sobre los neutros o cables

<sup>[17]</sup> Ver referencia [16]

de guarda, en caso de existir, o son debidos a descargas indirectas que no impactan directamente la línea pero alteran el campo electromagnético a su alrededor, induciendo sobre tensiones en la misma, como se muestra en la figura 5.22.

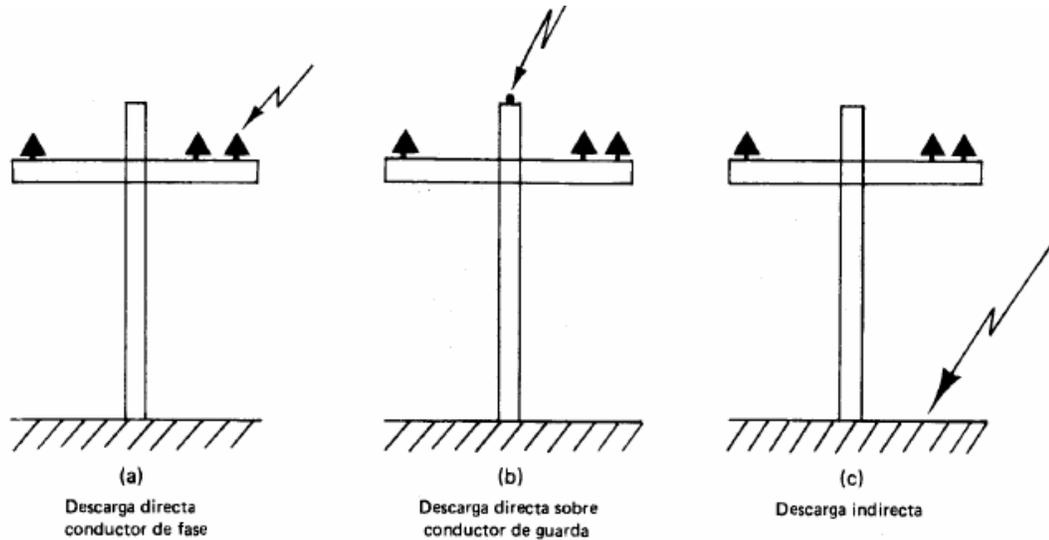


Figura 5.22. Influencia de descargas atmosféricas en líneas de distribución.

Si tenemos en cuenta que la tensión crítica de flameo (tensión a la cual el aislamiento produce flameos el 50% de las veces), de una línea de distribución, es normalmente inferior a 200 KV, se puede concluir es muy poco probable que una línea de distribución soporte sin flamear una descarga directa sobre los conductores de fase.

La ruptura del aislamiento interno del aislador no siempre se produce, debido a que el aislamiento del aire normalmente se rompe primero, pero a medida que la tasa de crecimiento de la tensión es mayor, la rigidez del aislamiento del aire mejora ostensiblemente y puede ocurrir que se haga superior a la del aislamiento interno del aislador obligándolo a que se produzca la ruptura eléctrica a través de él.

Si la magnitud de la corriente de retorno de la descarga tiene suficiente valor, producirá flameo al aire y en consecuencia una falla monofásica que obligará la salida del circuito, con el consiguiente deterioro de la calidad del servicio.

## CONCLUSIONES DEL CAPITULO V

En esta parte se hizo un análisis matemático del comportamiento de las sobretensiones debidas a descargas atmosféricas; no solo este tipo de sobretensiones existe pero son las que mas problemas dan.

El análisis es una representación de los problemas sucedidos en las líneas de distribución, se puede ver la importancia del software de análisis ya que muestra con bastante fidelidad los datos que se obtienen. En este caso se ocupo el Matlab 6.5 y el ATPDraw 3.7 para realizar dicho análisis.

Los datos que se obtuvieron con el generados de impulsos y compararlos con los obtenidos por medio de simulación no difieren, por lo que se puede concluir que usar los simuladores para el análisis de sobretensiones es una buena opción a la hora de no tener equipos de laboratorio para hacer pruebas.

## REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- [1] CARACTERISTICAS PRINCIPALES DEL PROCESO DE DESCARGA DE UN RAYO.  
<http://www.attractor.com.ar/paginas/carac%20desc%20rayo.htm>
- [2] INFLUENCIA DE LAS SOBRETENSIONES POR DESCARGAS ATMOSFERICAS Y COMPORTAMIENTO DE LOS SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA EN LINEAS AEREAS DE TRANSMISION Y DISTRIBUCION.  
<http://prof.usb.ve/mmlozano/DOCS/ALTAE.pdf>
- [3] SEGURIDAD CONTRA RAYOS DEL SIGLO 21° PARA AMBIENTES QUE CONTIENEN ELECTRÓNICA SENSIBLE, EXPLOSIVOS Y SUSTANCIAS VOLÁTILES.  
[www.lightningsafety.com/nlsi\\_lls/21stcent\\_spanish.doc](http://www.lightningsafety.com/nlsi_lls/21stcent_spanish.doc)
- [4] Lightning Facts.  
<http://home.earthlink.net/~jimlux/lfacts.htm>.
- [5] Fusion - Physics of a Fundamental Energy Source  
[http://fusedweb.pppl.gov/CPEP/Chart\\_Pages/5.Plasmas/Lightning.html](http://fusedweb.pppl.gov/CPEP/Chart_Pages/5.Plasmas/Lightning.html)
- [6] TESIS DOCTORAL: Evaluación estadística del comportamiento de líneas aéreas de distribución frente a sobretensiones de origen externo. Ing. Francisco A. Martines Velasco. UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA, DEPARTAMENT D'ENGINYERIA ELÈCTRICA. Barcelona, 2001.
- [7] WIRE AND NAKED CABLES.  
<http://www.haesa.com.mx/condviakon2.html>
- [8] Especificaciones técnicas para la construcción de líneas aéreas de distribución de energía eléctrica. CAEES.
- [9] IEEE Working Group Report, "Calculating the Lightning Performance of Distribution Lines", IEEE Trans. on Power Delivery, vol. 5, no. 3, pp. 1408-1417, Julio 1990.
- [10] Ecuación B.6, IEEE STD 1410-1997, IEEE Guide for Improving the Lightning Performance of Electric Power Overhead Distribution Lines.
- [11] Figura B.3, IEEE STD 1410-1997, IEEE Guide for Improving the Lightning Performance of Electric Power Overhead Distribution Lines.

[12] Ecuación B.1, IEEE STD 1410-1997, IEEE Guide for Improving the Lightning Performance of Electric Power Overhead Distribution Lines.

[13] Ver anexo 1

[14] Técnica de la Alta Tensión. Por los Ings. Jorge N. L. Sacchi - Alfredo Rifaldi.  
<http://www.ing.unlp.edu.ar/sispot/at-index.htm>

[15] Puede obtenerse una copia del ATPDraw en:  
<ftp.ee.mtu.edu> ó <ftp.rrzn.uni-hannover.de>

[16] Boletín N°13, CONSIDERACIONES SOBRE EL COMPORTAMIENTO DE LAS LÍNEAS DE DISTRIBUCIÓN ANTE DESCARGAS ATMOSFÉRICAS; Ingeniero Jaime Blandón Díaz, Electroporcelana GAMMA S.A. Empresa de la Organización Corona. Colombia.

## CONCLUSIONES GENERALES Y RECOMENDACIONES

Al dar por concluida el presente trabajo se presentan algunas conclusiones generales y recomendaciones las cuales se presentan en las siguientes líneas:

### CONCLUSIONES

1. La prueba impulso no tiene porque ser una prueba destructiva para todo equipo cuyo proceso de fabricación y materiales utilizados en su fabricación cumpla con las normas o estándares establecidos para ellos. Esta conclusión contrasta con la opinión encontrada en nuestro medio de que la prueba impulso es una prueba destructiva. Se argumenta por ejemplo que aun cuando el equipo no falle durante la prueba, puede fallar cuando esté en operación debido a que su aislamiento ha sido debilitado. Sin embargo consideramos que este argumento no es válido ya que si el equipo ha sido bien diseñado y construido con materiales de calidad,, entonces debe ser capaz de soportar el nivel de tensión de impulso especificado y además porque los niveles de tensión de prueba especificados por las normas están por debajo del nivel de tensión que es capaz de soportar el aislamiento del equipo.
2. La amplitud del servicio de realización de la prueba impulso que puede ofrecerse se ve limitada por el máximo voltaje de salida que es posible obtener con el generador (400 Kv), con lo cual solo podrían someterse a prueba equipos que operan a un voltaje de sistema hasta de 69 Kv, cuyo BIL es de 400 Kv, aunque con algunas limitaciones, especialmente en la realización de la prueba de frente de onda para este último voltaje, para el cual el voltaje de salida requerido excede el voltaje de salida máximo del generador. El servicio realmente puede ofrecerse cuando se disponga de equipo adicional el cual es necesario adquirir.
3. El laboratorio de la prueba impulso existente podría utilizarse para un programa de capacitación de personal en este campo, para lo cual debería darse un convenio de cooperación entre La Escuela de Ingeniería Eléctrica y las instituciones interesadas. Podría además utilizarse para comprobar el estado del aislamiento del equipo que ya ha estado en operación, equipo que ha sido reconstruido y aún más, para realizar pruebas de

tipo en muestras de equipo nuevo a adquirir, las cuales serian proporcionadas por el fabricante mediante convenio entre este y el comprador.

4. El laboratorio de la prueba de impulso y la realización de esta exige de parte del personal encarando de amplios conocimientos en el área de prueba de alta tensión a fin de evitar cualquier accidente y dar mantenimiento debido al equipo.
5. El personal encarando debe tener conocimientos en el área de instrumentación y medición a fin de mantener el equipo de medición y control en buen funcionamiento y evitar las fuentes de error tales como la presencia de señales parásitas en los oscilogramas de voltaje y corriente.

## RECOMENDACIONES

- 1- Para que el laboratorio cumpla con las medidas de seguridad básicas, debe dotarse de una puerta metálica corrediza equipada con un interruptor o una chapa eléctrica la cual no permita la energización del laboratorio cuando esta esté abierta. Debe dotarse además de dos luces indicadoras de cuando se están realizando las pruebas y cuando se han finalizado, respectivamente.
- 2- Para ofrecer el servicio es necesario dotar el laboratorio de equipo complementario a fin de poder realizar las pruebas de manera eficiente.
- 3- El laboratorio de la prueba de impulso debería establecerse como una unidad dentro de la facultad paralela a la Escuela de Ingeniería Eléctrica y tener una dirección propia con su personal administrativo y técnico. Deberá contratarse personal que se dedique exclusivamente al desarrollo de este laboratorio, estableciendo además un programa de capacitación con fin de que el personal adquiriera los conocimientos y experiencia necesaria para la realización de las pruebas.
- 4- Adquirir normas americanas y europeas relativas a la realización de la prueba impulso en dispositivos utilizados en El Salvador: Transformadores, aisladores, e interruptores etc.
- 5- Difundir la prueba mediante conferencias y ofrecer el servicio mediante visitas a clientes.
- 6- Adquirir bibliografía relativa a la Ingeniería de Alta Tensión, así como bibliografía específica al tema de la prueba impulso, estableciendo además contactos con otros países o instituciones que dispongan de laboratorios para la realización de este tipo de pruebas.

## ANEXO A

### Fluke 123/124 Industrial ScopeMeter

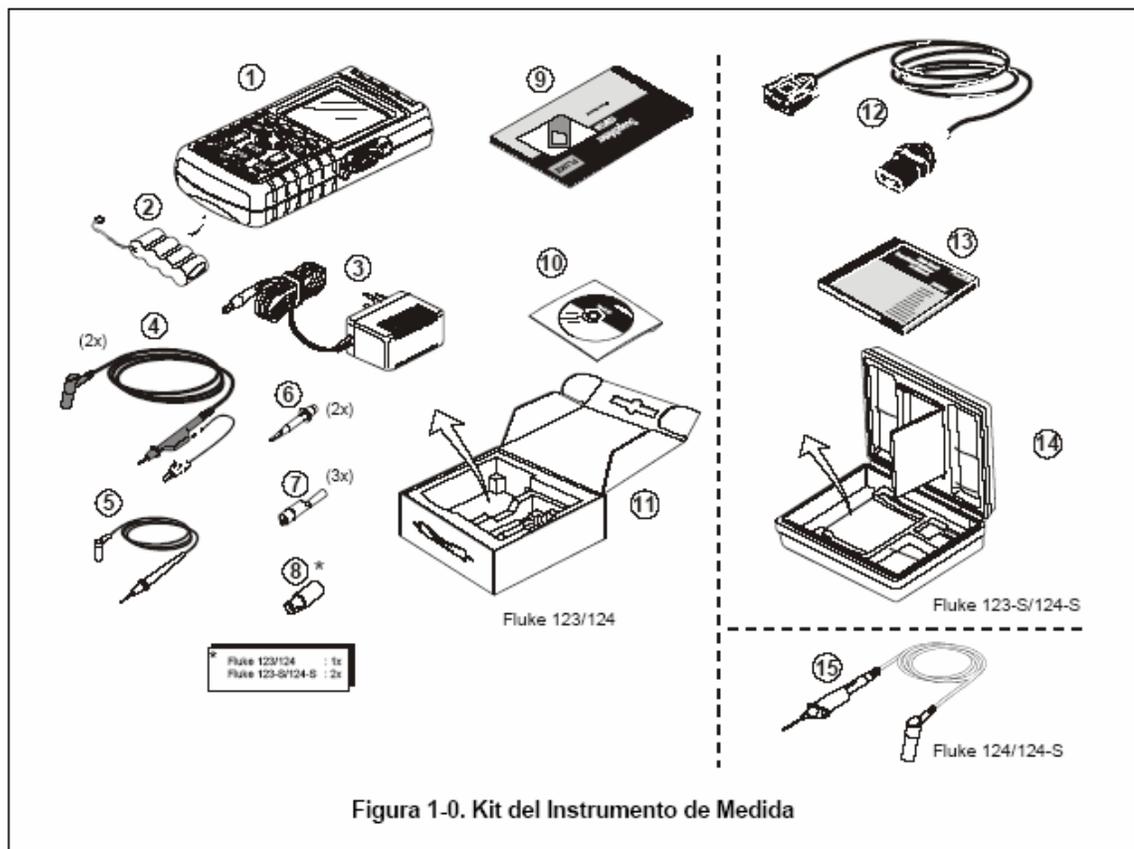
#### Puesta en funcionamiento

E

Sep 2002

2002 Fluke Corporation, Todos los derechos reservados.

Impreso en Holanda. Todos los nombres de productos son marcas comerciales de sus respectivos titulares.



#### Introducción

En este Manual de iniciación se proporciona información básica sobre los instrumentos de medida ScopeMeter 123 y 124 de Fluke. Para obtener instrucciones de funcionamiento completas, consulte el Manual de uso incluido en el CD-ROM adjunto.

Contacto con un centro de asistencia

Para obtener la lista de los centros de servicio autorizados de Fluke, visite nuestro sitio Web: [www.fluke.com](http://www.fluke.com) o bien llame a Fluke, a cualquiera de los números que a continuación se relacionan:

+1-888-993-5853 en Estados Unidos y Canadá

+31-40-2675200 en Europa

+1-425-446-5500 desde otros países.

## Puesta en funcionamiento

Información de seguridad: Lea primero

El instrumento de medida Fluke 123/124 (a partir de ahora referido como "Instrumento de medida") cumple las normas siguientes:

- ANSI/ISA S82.01-1994
- EN/IEC61010-1 (1993), 600 V categoría III Instalaciones, Grado 2 de contaminación
- CAN/CSA-C22.2 No.1010.1-92 (incluyendo homologación)
- UL3111-1 (incluyendo homologación)

Utilice el instrumento de medida tal como se especifica en el Manual de uso. De lo contrario, la protección proporcionada por el instrumento de medida podría verse afectada.

Una Advertencia identifica acciones y situaciones que suponen un riesgo para el usuario. Una Precaución instrumento de medida.

### **Advertencia**

Para evitar que se produzcan descargas eléctricas o incendios:

- Utilice únicamente la fuente de alimentación, modelo PM8907 (cargador de batería / adaptador de red).
- Antes de utilizarlo, compruebe que el rango de tensión seleccionado o indicado en el PM8907 coincide con la tensión y frecuencia de la alimentación de la red eléctrica local.
- Para el cargador de batería/adaptador de red PM8907/808 utilice únicamente cables de alimentación de red conformes a las normas de seguridad locales.

### **Nota**

Para acomodar la conexión a varios zócalos de alimentación de red eléctrica, el cargador de batería / adaptador de red universal PM8907/808 está equipado con un conector macho que

debe conectarse a un cable de alimentación apropiado para el uso local. Puesto que el adaptador está aislado, el cable de alimentación no tiene que estar equipado con un terminal para la conexión a tierra de protección.

Puesto que la disponibilidad de los cables de alimentación con terminales con conexión a tierra de protección es más común, podría considerar su uso de todas maneras.

La tensión nominal de 230 V del PM8907/808 no se puede utilizar en América del Norte. Para modificar las configuraciones de las láminas para un determinado país debe disponerse de un adaptador de red que cumpla los requisitos nacionales pertinentes.

### **Advertencia**

Para evitar descargas eléctricas o incendios como consecuencia de la conexión del instrumento de medida a una tensión de pico superior a 42 V (30 Vrms) o a circuitos de más de 4800 VA:

- Utilice sólo sondas de tensión, cables de prueba y adaptadores aislados que se proporcionan junto con el instrumento de medida, o bien, que sean apropiados para el instrumento de medida Fluke 123/124.
- Antes de utilizar el instrumento inspeccione las sondas de tensión, los cables de prueba y los accesorios para cerciorarse de que no presenten daños mecánicos; si estuviesen dañados, cámbielos.
- Desconecte todas las sondas, cables de prueba y accesorios que no esté utilizando.
- Antes de conectar el cargador de batería al instrumento de medida, conéctelo primero al enchufe de corriente alterna.
- No conecte el alambre de puesta a tierra (figura 1-0, accesorio 5) a tensiones pico superiores a 42 V (30 Vrms) respecto al potencial de la tierra de protección.
- No aplique tensiones de entrada superiores a la tensión nominal del instrumento. Adopte precauciones al utilizar cables de prueba 1:1, ya que la tensión de la punta de sonda se transmitirá directamente al instrumento de medida.
- No utilice conectores BNC o de clavija banana metálicos sin aislamiento.
- No introduzca objetos metálicos en los conectores.

- Utilice siempre el instrumento de medida únicamente del modo especificado.

Tensión máx. de entrada

Directa en entrada A y B.....600 V CAT III  
 Entrada A y B a través de BB120. ....300 V CAT III  
 Entrada A y B a través de STL120.. ....600 V CAT III

**Tensión máx. flotante**

Entre cualquier terminal y masa..... 600 V CAT III

Las tensiones nominales se indican como "tensiones de servicio". Deben leerse como VCA-rms (50-60 Hz) en aplicaciones de onda sinusoidal CA, y como VCC en aplicaciones de CC.

La Categoría III de sobretensión hace referencia al nivel de distribución y a los circuitos de instalación fija en el interior de un edificio.

Los términos "Aislado" o "Eléctricamente flotante" se utilizan en este manual para indicar una medición en la que la clavija de entrada tipo banana apantallada o banana del instrumento de medida está conectada a una tensión distinta de la del potencial de la tierra de protección.

Los conectores de entrada aislados no tienen partes metálicas expuestas, y están totalmente aislados para protegerlos contra descargas eléctricas.

**En caso de deteriorarse las funciones de seguridad**

La utilización del instrumento de medida de un modo distinto al especificado por el fabricante puede afectar a la protección proporcionada por el equipo.

Antes de utilizarlo, inspeccione los cables de prueba para cerciorarse de que no presenten daños mecánicos; si fuese necesario, cámbielos.

Si existe la probabilidad de que los dispositivos de seguridad se hayan deteriorado, debe desconectarse el instrumento de medida y desenchufarlo de la alimentación eléctrica. A continuación, solicite la asistencia de personal cualificado. Por ejemplo, la seguridad puede haberse deteriorado si el instrumento de medida no realiza las mediciones previstas o presenta señales visibles de daños.

## Preparación para el uso

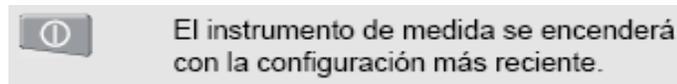
En el instrumento nuevo, es posible que las baterías instaladas estén descargadas. Para cargarlas al máximo deberá cargarlas durante 5 horas (Fluke 123) o 7 horas (Fluke 124) con el instrumento de medida desconectado:

- Utilice únicamente el cargador de batería/adaptador de red, modelo PM8907
- Antes de utilizarlo, compruebe que la gama de tensión y frecuencia del PM8907 coincide con la gama de alimentación de la red eléctrica local
- conecte el cargador de batería a la toma de red CA
- conecte el cargador de batería a la toma del ADAPTADOR DE ALIMENTACIÓN situado en la parte derecha del instrumento de medida.

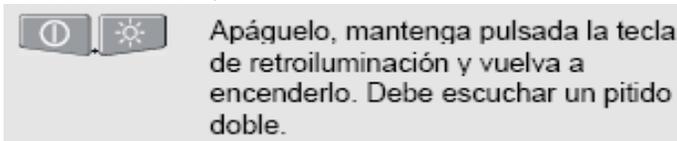
## Precaución

Para evitar la disminución de capacidad de la batería, es necesario cargar las baterías al menos una vez al año.

Conexión y reajuste del instrumento de medida  
Apagado/encendido:



Reajuste del instrumento de medida según los valores de fábrica (predeterminado):



## Cambio de la retroiluminación y contraste

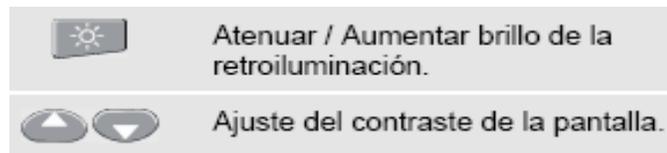
Para conservar la energía de las baterías, se puede ajustar la pantalla con un modo de brillo económico cuando el instrumento de medida funciona alimentándose de éstas (sin adaptador de red).

## Nota

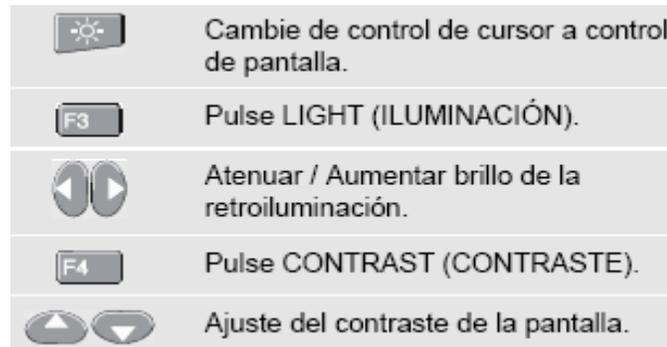
El empleo de una pantalla atenuada prolonga la autonomía de las baterías.

Para cambiar el brillo de la pantalla, presione repetidamente:

Para cambiar el brillo y contraste de la pantalla en el Fluke 123, presione repetidamente:



Para cambiar el brillo y contraste en el Fluke 124:



### Lectura de la pantalla

La pantalla está dividida en tres áreas que se indican en la figura 1. Estas son las siguientes:

**Área de lectura (A):** Muestra las lecturas numéricas. Si sólo está activada la entrada A, verá únicamente las lecturas de la entrada A. Si está conectada la entrada B, también verá las lecturas de la entrada B.

**Área de forma de onda (B):** Presenta la forma de onda de la entrada A (B). El identificador de traza (A) puede verse a la izquierda de la forma de onda. El icono cero (-) identifica el nivel del grupo de la forma de onda. La línea inferior presenta las gamas / div y el indicador de alimentación de energía (red o batería).

### Nota:

Cuando el instrumento funciona con alimentación de batería, el indicador de batería le informa del estado de la misma desde llena a vacía.



**Área de menú (C):** Presenta el menú que proporciona opciones disponibles mediante las teclas de dirección azules y la tecla ENTER:



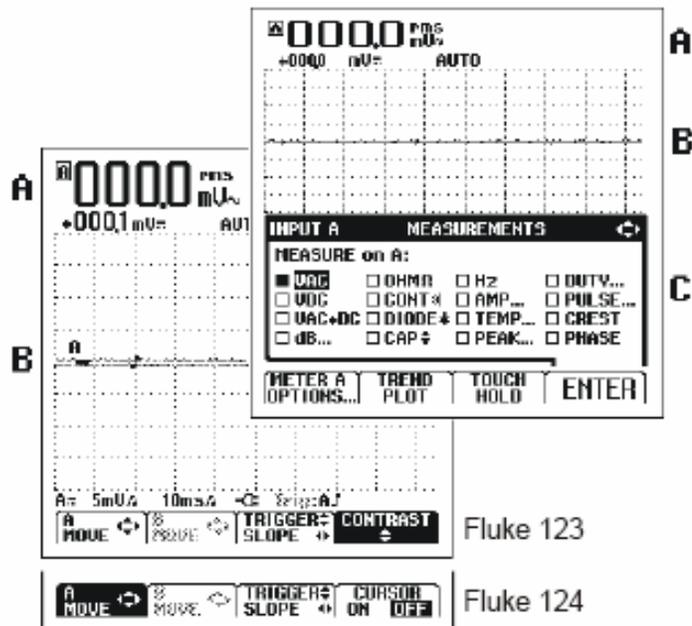
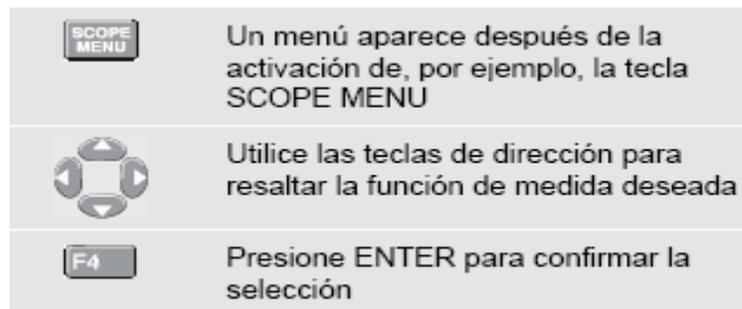


Figura 1 . El área de la pantalla

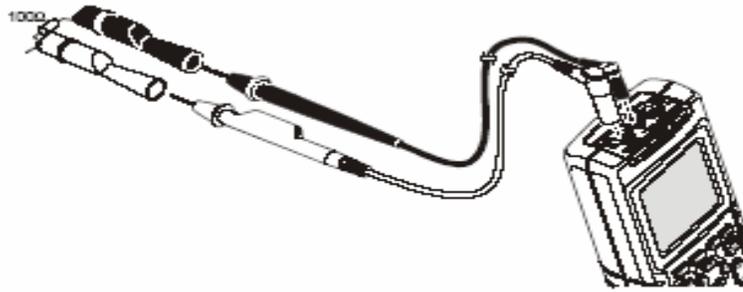
### Realizar selecciones de menú

La selección de una función en el menú se realiza de la siguiente manera:



### Mediciones del medidor

El modo del medidor se utiliza para efectuar medidas de OHM $\Omega$ , CONTinuidad, DIODO y CAPacidad. Utilice el cable de prueba apantallado rojo en la entrada A y el cable de puesta a tierra largo negro en la entrada COM (común) tal como se muestra en la figura 2.



**Figura 2 . Disposición del cable de prueba para medidas del medidor**

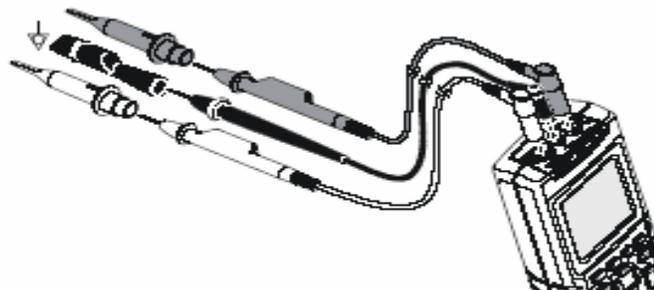
Para medir, por ejemplo, una resistencia, realice los pasos siguientes:

	Abra el menú INPUT A (entrada A)
	Seleccione OHMΩ
	Seleccione la medición en ohmios. El valor de resistencia aparece en ohmios. Observe también que se muestra una barra gráfica

### Conexiones con el osciloscopio y puesta a tierra

Para realizar medidas de entrada únicas, utilice el cable de prueba apantallado rojo en la entrada A. Para efectuar medidas en dos señales diferentes, utilice también el cable de prueba apantallado gris en la entrada B.

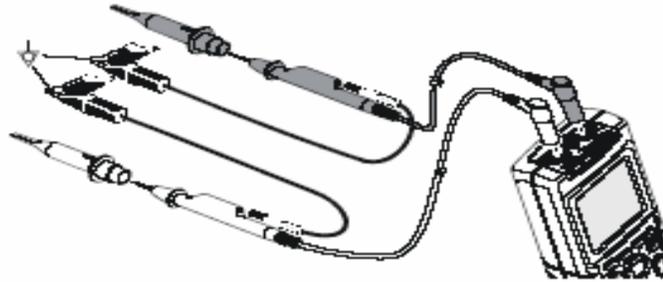
Para efectuar medidas de baja frecuencia y niveles de señal alta, utilice la entrada COM (común) negra como conexión a tierra única. Esto se muestra en la figura 3.



**Figura 3 . Conexión a tierra con cable de puesta a tierra sin apantallar.**

Para efectuar medidas a frecuencias más altas o niveles bajos, utilice cables de prueba apantallados con cables de conexión a tierra cortos, en lugar de utilizar la entrada COM.

Tenga en cuenta que los cables de conexión a tierra cortos deben conectarse a la misma potencia. Consulte la figura 4.



**Figura 4 . Conexión a tierra con cables de conexión a tierra cortos**

### **Advertencia**

Para evitar que se produzcan descargas eléctricas o incendios, utilice únicamente una conexión COM (común) , o asegúrese de que todas las conexiones a COM tienen la misma potencia.

### **Nota:**

El Fluke 124 incluye una Sonda de osciloscopio 10:1. Se recomienda utilizar una sonda al medir señales de alta frecuencia en circuitos con alta impedancia. La sonda, tal como se entrega, coincide con el instrumento de medida sin ajuste adicional de alta frecuencia.

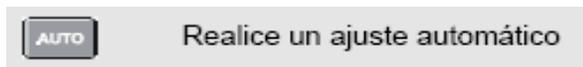
Para la conexión a tierra de la sonda, utilice un cable de puesta a tierra corto como el utilizado con los cables de prueba apantallados.

### **Visualización de una señal desconocida con Connect-and-View**

La función Connect-and-View permite el funcionamiento automático, con el objeto de visualizar señales desconocidas complejas. Esta función optimiza la posición, rango, base de tiempos y disparo, y asegura una presentación estable de prácticamente cualquier forma de onda. Si la señal cambia, la configuración controlará estos cambios.

Para activar la función Connect-and-View, proceda del siguiente modo:

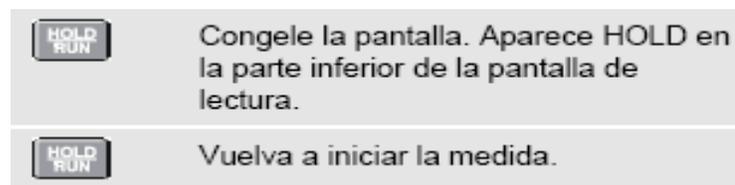
- Conecte el cable de prueba rojo desde la entrada A roja hasta la señal desconocida que se va a medir.



Ciertos detalles de la forma de onda pueden hacerse visibles modificando manualmente la amplitud, base temporal, posición de la forma de onda y disparo. Esto se explica en esta Guía.

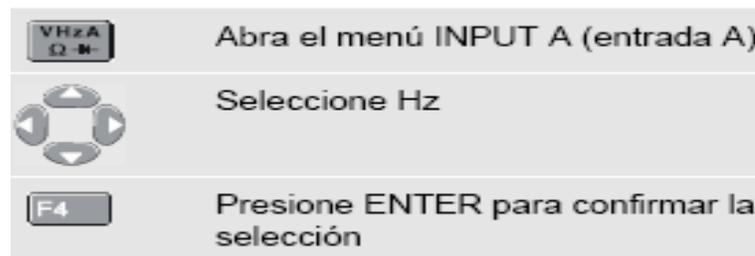
### Congelar la pantalla

Puede congelar la pantalla (formas de onda y lecturas) con la tecla HOLD/RUN. De esta manera puede leer la pantalla cuando el instrumento de medida se ha desconectado del dispositivo que se va a comprobar.



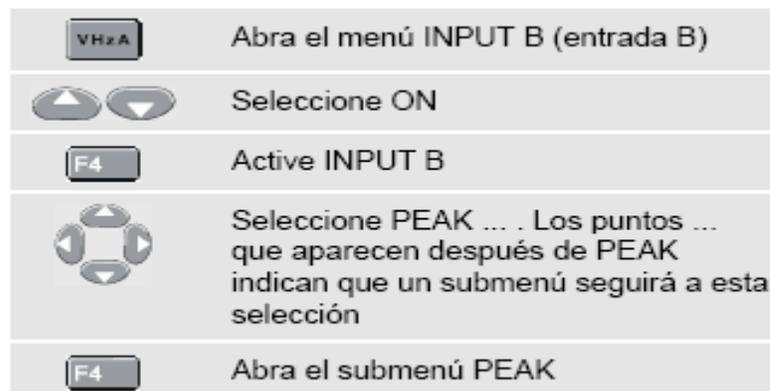
### Mediciones de osciloscopio en entrada A y B

Seleccione la medida de frecuencia (Hz) para la entrada A.



Observe que Hz es ahora la lectura principal. La anterior lectura principal se ha movido ahora a la posición de lectura secundaria más pequeña. Esto se muestra en la figura 5.

Seleccione lectura de pico a pico para la entrada B:



 Seleccione PEAK-PEAK  
 Presione ENTER para confirmar la selección

Ahora verá una pantalla como la de la figura 5. Las trazas A y B proporcionan una representación gráfica de las formas de onda aplicadas a la entrada A y B.

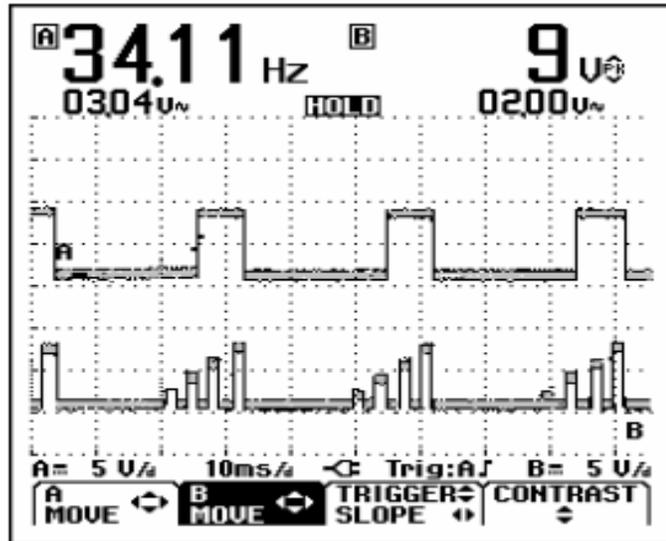


Figura 5 . Medidas en la entrada A y B

Cambio manual de la representación de forma de onda

Cambio de amplitud:

 Aumenta o reduce la amplitud de la forma de onda; existen teclas independientes para la entrada A y B

Cambio de la base temporal:

 Aumenta o disminuye el número de periodos

Posicionamiento de las trazas:

 Selecciona A MOVE o B MOVE  
 Posicione la forma de onda seleccionada en la posición de pantalla deseada

Ajustes de disparo: el disparo indica al instrumento de medida cuándo comenzar a presentar la forma de onda. El punto de disparo en la forma de onda viene indicado por el identificador de disparo (**I**). El nivel y pendiente de disparo pueden ajustarse según las preferencias personales. Esto puede contribuir a obtener ciertos detalles de la señal dentro del área de presentación:

	Habilita las teclas de dirección para nivel de disparo y pendiente
	Ajuste el nivel de disparo
	Seleccione pendiente negativa o positiva

### Mediciones con cursor

El Fluke 124 incluye cursores. Los cursores le permiten efectuar medidas digitales precisas en formas de onda vivas y en las guardadas.

	Abra las funciones de la tecla cursor: 
	Seleccione el tipo de medida del cursor:
	Mida la altura de señal en un punto de tiempo.
	Mida la diferencia de la altura de señal entre dos puntos de tiempo y mida la diferencia de tiempo entre estos dos puntos.
	Mida la altura de señal en las posiciones del cursor y entre posiciones del cursor.
	Mida el tiempo de subida o tiempo de bajada.
	Seleccione el cursor que se va a mover. Utilice las teclas de flecha azules para mover los cursores.
	En función del tipo de medida del cursor:
	Medidas del cursor en traza A o B.
	Medida de tiempo de subida automática o manual en un único canal.
	Desconecte las medidas del cursor.

## Manu INPUT A / menu INPUT B

	<ul style="list-style-type: none"><li>• En el menú INPUT A puede seleccionar entre muchas funciones de medida. La selección se realiza con las teclas de dirección y se activa con F4.</li><li>• Las teclas de función F1, F2 y F3 proporcionan acceso a los submenús.</li></ul>
	METER A OPTIONS ... : en este menú puede seleccionar opciones de medida como Acoplamiento, Suavizado y Referencia cero.
	TREND PLOT: traza el curso de las lecturas como una función de tiempo.
	TOUCH HOLD captura y congela un resultado de medida estable. Esto viene indicado por un pitido.
	En el menú INPUT B, pueden seleccionarse las funciones como las del menú INPUT A.

## Menu Scope

	<ul style="list-style-type: none"><li>• El menú SCOPE se utiliza para seleccionar las condiciones de la señal de entrada A y B, como acoplamiento y presentación normal/invertida.</li><li>• Las teclas de función F1, F2 y F3 proporcionan acceso a los submenús.</li></ul>
	SCOPE OPTIONS ...  SCOPE MODE <ul style="list-style-type: none"><li>• NORMAL: el modo utilizado más comúnmente.</li><li>• SINGLE SHOT: puede utilizarse para captar sucesos únicos.</li><li>• ROLL MODE: resulta útil para controlar formas de onda de baja frecuencia.</li></ul> WAVEFORM MODE <ul style="list-style-type: none"><li>• NORMAL: el modo que se utiliza más comúnmente.</li><li>• SMOOTH: se utiliza para suprimir ruido.</li><li>• ENVELOPE: registra todos los valores de formas de onda activas. En la pantalla, se muestra el envolvente que resulta.</li></ul>

F2	<p>PROBES ...</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• PROBE on A: para la selección del tipo de sonda apropiado cuando se utilizan sondas que no son estándar.</li> <li>• PROBE on B. Igual que la descripción de la entrada A.</li> <li>• PROBE AC ADJUST. Para el ajuste de sondas de tensión 10:1 distintas de las suministradas con el Fluke 124. Esto es necesario para corregir medidas de alta frecuencia.</li> </ul>
F3	<p>TRIGGER ...</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• INPUT: selección de la fuente de disparo a la que se orienta el instrumento de medida. Se puede realizar un disparo EXTERNO a través de una sonda de disparo aislada ópticamente.</li> <li>• SCREEN UPDATE: FREE RUN proporciona la actualización de pantalla automática, aunque no haya disparos. ON TRIG proporciona únicamente la actualización de pantalla cuando se produce un disparo válido.</li> <li>• AUTO RANGE: selección de ajuste automático en señales &gt;15 Hz (respuesta rápida) o &gt;1 Hz (más lenta).</li> </ul>

### **Menú User Options**

USER options	<ul style="list-style-type: none"> <li>• USER OPTIONS proporciona submenús para configurar el instrumento de medida según las preferencias personales:</li> <li>• Las teclas de función F1, F2 y F3 proporcionan acceso a los submenús.</li> </ul>
F1	<p>BATTERY REFRESH.. : (ACTUALIZACIÓN DE BATERÍA) debe realizarse unas cuatro veces al año para mantener las baterías en buen estado.</p>
F2	<p>LANGUAGE: en este menú puede seleccionarse el idioma de los mensajes.</p>
F3	<p>VERSION &amp; CAL ... muestra información sobre la versión.</p>

## **Menu SAVE / PRINT**

	<ul style="list-style-type: none"><li>• SAVE / PRINT le permite guardar Pantallas y Configuraciones en la memoria, para utilizarlas con posterioridad.</li><li>• Las teclas de función F1 y F2 proporcionan acceso a los submenús.</li></ul>
	PRINTER SETUP: selección de tipo de impresora y tasa de baudios.
	PRINT SCREEN: Se imprime la pantalla activa
	DELETE ALL (ELIMINAR TODO): Elimina todas las memorias al mismo tiempo

## Anexo B

### Prueba al impulso de rayo a bobinados de baja impedancia

Hay cuatro métodos alternativos para la prueba a bobinados de baja impedancia..

Esos métodos son los siguientes.

- a) Método 1: Todos los terminales del mismo BIL, deberán ser conectados juntos.
- b) Método 2: Un resistor de no mas de  $500\Omega$  deberá ser conectado en el extremo de tierra
- c) Método 3: Una prueba normal de impulso con una onda de corta duración en la cola la cual deberá ser aceptada.
- d) Método 4: Una red inductiva o resistiva será insertada entre el generador de impulsos y el transformador para incrementar la longitud del tiempo de cola.

#### Metodo 1

Conectar las terminales conjuntamente produce una alta tensión en el aislamiento del bobinado a tierra. Esto es debido a la tensión que atraviesa el extremo de la bobina principal el cual es una función de la capacitancia de un extremo del bobinado al otro y de la capacitancia a tierra. Se pueden visualizar estas afirmaciones un poco mejor por medio del uso del ejemplo siguiente

Ejemplo: Las constantes del transformador son representadas por un circuito equivalente como se muestra en la figura 8a.

Por tanto la capacitancia (capacitancia de un extremo de la bobinado al otro extremo) del transformador es representado por C 1 y C 2, y la capacitancia a tierra por C 3. L 1 y L 2 representan las inductancias del transformador.

Si la capacitancia de un lado a otro, C 1 y C 2, son grandes con respecto al la capacitancia a tierra, resulta una distribución similar a la curva X en Figure 8b.

Ya que la distribución final es la línea Y, la oscilación sobre el bobinado seria similar a la curva X y X'. Este ejemplo demuestra una baja tensión a través del bobinado pero una tensión alta al conectar con tierra todo el bobinado.

Si las capacitancias son pequeñas comparadas con la capacitancia de tierra, reulsta una distribución similar a la curva Z en Figura 8b

La misma línea de distribución Y ocurrirá y así la oscilación sería entre la curva Z y Z'. Esto produce un alto voltaje a través de las espiras y el aislamiento a tierra. El inconveniente al usar este método de prueba para un transformador es que se asume que parte del devanado puede oscilar a 200% del voltaje aplicado. La prueba en esta manera no es recomendada en funcionamiento, es raramente aplicado para ambas terminales simultáneamente.

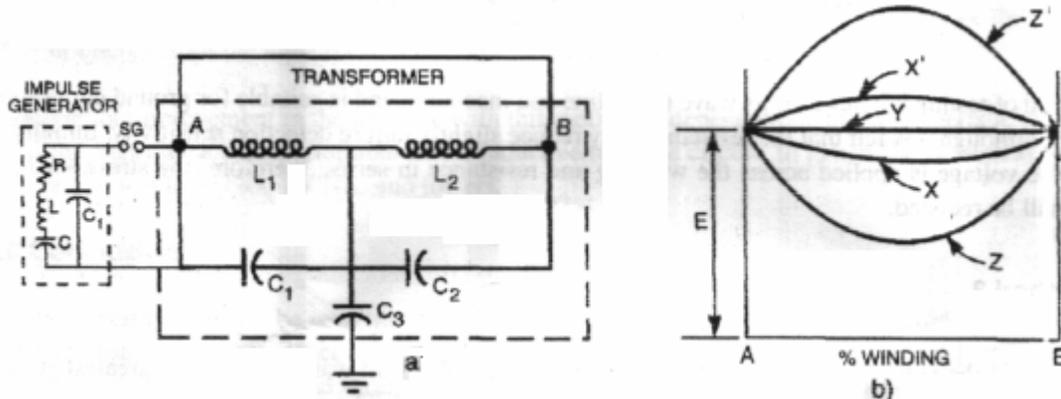


Figura 8 Los devanados de baja impedancia conectados juntos

### 2.4.3 Metodo 2

Insertando una resistencia en el extremo del devanado a tierra producirá diferentes voltajes en la bobina que el método 1. El cambio en la tensión es una función de las constantes de la bobina. La figura 9 muestra la red equivalente del transformador con un extremo del devanado a tierra a través de un resistor. Si la capacitancia a través de sus extremos es grande comparada con la capacitancia a tierra, entonces una distribución parecida a curva P en la figura 9b resultará. La distribución sería algunas veces similar a la curva Q, donde todos o la mayor parte del voltaje está a través del resistor. La oscilación entonces estará entre P de la curva y P'. En este caso la tensión de recorte de la bobina es aumentada comparado con el ejemplo que tiene la misma relación de capacitancia en el método 1. Cuando la capacitancia a tierra es grande, comparada para la capacitancia de los bobinados, una distribución parecido a la curva S en la figura 9b aparecera. La distribución final otra vez puede ser asumido para la línea Q.

La envolvente de oscilación entre S y S'. Otra vez se logra producir un voltaje excesivo a través del devanado a tierra. Es práctica general insertar sólo una resistencia

para producir una cola  $50\mu\text{s}$  y el voltaje apareciera a través de la resistencia limitado a no más de 80 % del BIL del devanado a tierra. Si, en el último ejemplo, la resistencia requerida para producirlos unos  $50\mu\text{s}$  en la cola hubiera sido más pequeña, entonces la línea de distribución sería  $Q'$ , y la envolvente entonces estaría entre  $S$  y  $S''$ . El largo de la cola y el voltaje a través de la resistencia deberían ser medidos para determinar la resistencia a ser usada. Un generador de impulso de bajo voltaje y un osciloscopio pueden usarse para hacer estas medidas.

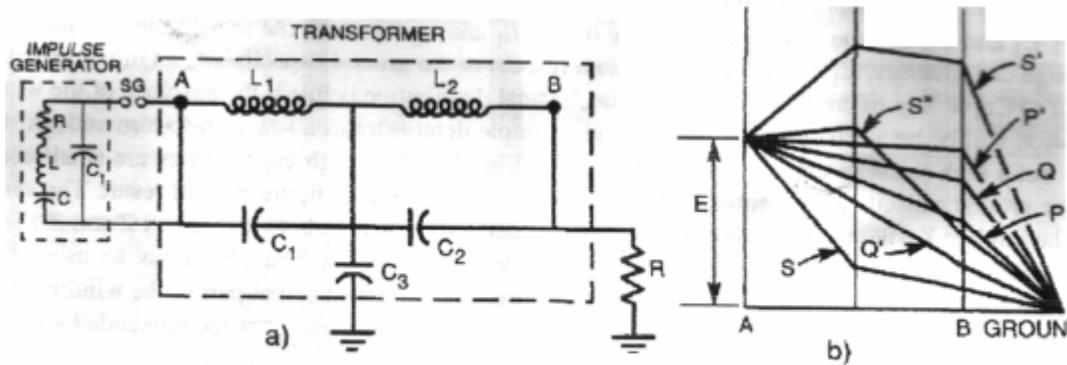


Figure 9— Winding grounded through a resistor

### Metodo 3

Aplicando todo el voltaje a través de la bobina, una onda con un tiempo de cola pequeño es usada, la tensión máxima para el aislador entre devanados es generalmente producido. En la figura 10a, el transformador equivalente es descrito con un extremo del devanado sólidamente a tierra. Si las capacitancias directas son grandes comparadas con la capacitancia de tierra, entonces una distribución de voltaje parecido a la curva  $M$  de la figura 10a resultará. La distribución final se representa por línea  $N$ , lo cual quiere decir que la oscilación estará entre  $M$  y  $M'$ . Cuándo las capacitancias directas son sumamente pequeña comparadas con la capacitancia a tierra, entonces una distribución de voltaje parecido a la curva  $O$  de la figura 10b ocurrirá, lo cual resultará en una sobre de oscilación entre  $O$  y  $O'$ . Otra vez, con este método de pruebas hay porciones del devanado que puede exceder el potencial aplicado para las terminales de la línea, pero generalmente estos devanados tienen constantes de tiempo, y el tiempo para  $T$  del punto para oscilar para su máximo tarda usualmente mucho. Este método de prueba es muy adecuado para medidas de corriente dado que allí que no hay incremento en la resistencia del circuito y el circuito por consiguiente tiene buena respuesta para las alteraciones de alta frecuencia.

Ninguna prueba de distribución está requerida para determinar el valor del resistor a ser usado.

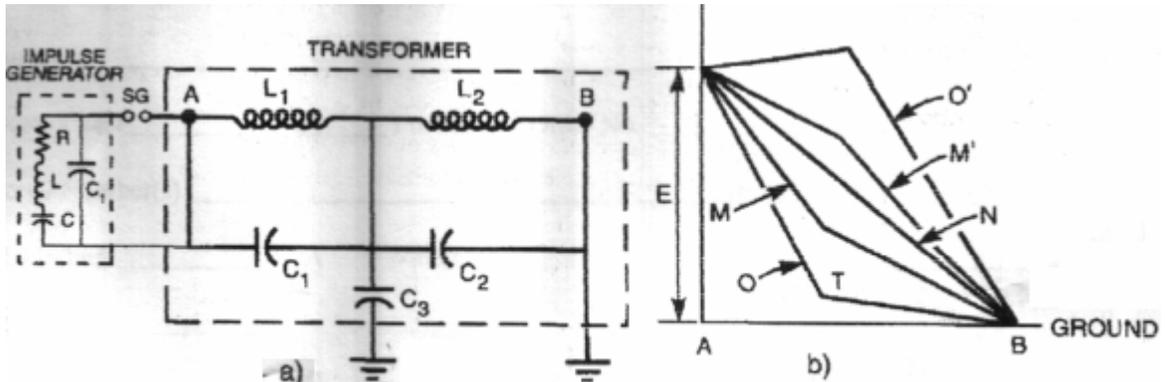


Figure 10—Effects due to short length of wave tail

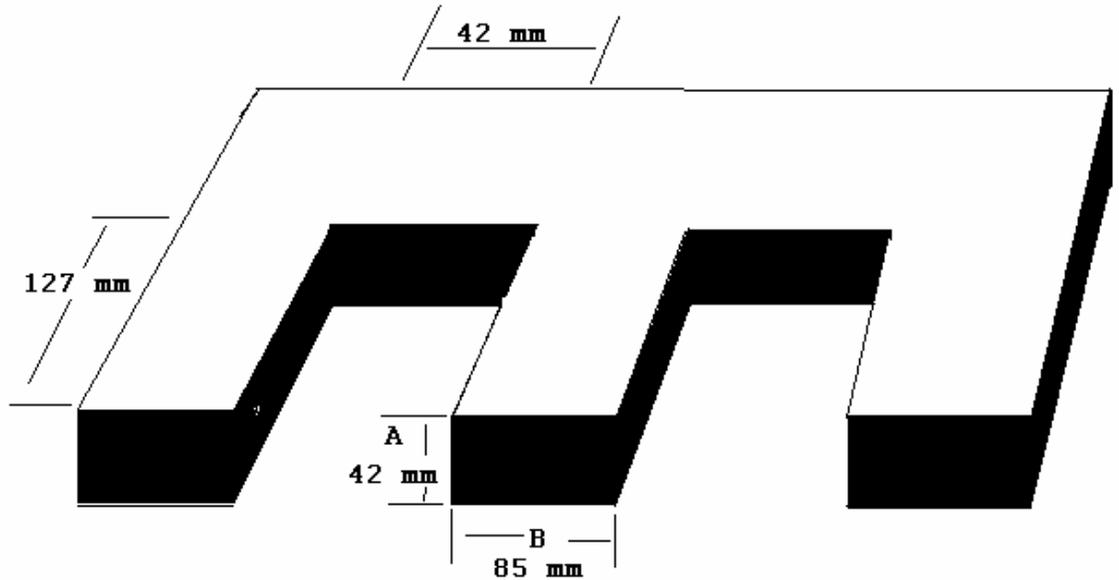
El método 4 Insertar una red del inductive/resistive entre el generador de impulso y el bobinado siendo probado a menudo pueden aumentar el tiempo de la cola más allá de tan disponible con el generador de impulso solo. Este acomodamiento confía en una transferencia de energía para el inductor del generador de impulso durante la porción del frente de la onda y un traspaso de energía del inductor para el devanado durante la porción de la cola de la ola. La cantidad de mejora en el tiempo de la cola con este método está bajo la dependencia de la característica de lo winding y los valores de impedancia disponibles en el circuito del inductive/resistive.

En general, este método es usado en los devanados inferiores (BIL 200 kV y se mueve hacia abajo) de voltaje.

**2.4.6 Conclusion** De estos ejemplos que puede ser visto que la construcción del transformador es un factor controlante en hacer una selección el método de probar devanados de baja impedancia . Cada fabricante debería estar familiarizado con la respuesta de tipo de la construcción del transformador y debería usar el método experimental aplicado que acentuará el devanado en una manera esperada en funcionamiento.

## ANEXO C

CALCULO MATEMATICO PARA LA CONSTRUCCION DEL TRANSFORMADOR DE AISLAMIENTO RELACION 1:1.



Proceso:

1- Encontrar el área del núcleo del transformador.

Área de un rectángulo  $A = \text{Base} \times \text{Altura}$

$$A = 85 \text{ mm} \times 42 \text{ mm} = 3.5417 \text{ pulg} \times 1.6535 \text{ pulg}$$
$$A = 5.8553 \text{ pulg}^2$$

2- Numero de espiras-voltios (E-V), 7.5 es una constante

Se divide 7.5 entre el área del núcleo

$$E-V = 7.5 / A = 7.5 / 5.8553 = 1.2809$$

3- Numero de espiras del devanado primario E(v)

Multiplicamos el voltaje primario por las E-V

$$NP = 220 \times 1.2809 = 281.8 \approx 282$$

4- Numero de espiras (vueltas) del devanado secundario.

Multiplicamos el voltaje secundario por las E-V.

$$N_{s1} = 110 \times 1.3553 = 149 \text{ vueltas}$$

$$N_{s2} = 220 \times 1.3553 = 298 \text{ vueltas.}$$

5- Cálculo de la potencia máxima con que podrá trabajar el transformador.

$$P_s = 220 \times 15 \text{ Amperios} = 3300 \text{ watts}$$

Como medida de seguridad se dará un margen del 10%

$$P_s + 10\% = 3630 \text{ watts}$$

6 Cálculo de la corriente que circulara en el devanado primario.

$$I_p = P / V = 3630 / 220 = 16.5 \text{ Amperios.}$$

7- Determinación del calibre del alambre de los devanados.

En este caso necesitamos determinar el diámetro en (mm) de los conductores que se usan en cada devanado para esto usamos la siguiente fórmula.

$$\text{Diámetro} = 0.8\sqrt{I}$$

$$\text{Diámetro Primario} = 0.8\sqrt{I_p} = 0.8\sqrt{16.5} = 3.25 \text{ mm}$$

$$\text{Diámetro Secundario} = 0.8\sqrt{I_s} = 0.8\sqrt{15} = 3.1 \text{ mm}$$

Después de obtener estos diámetros se determino el calibre, para esto se utilizo la tabla de características del alambre magneto.

Dado que los dos diámetros son aproximadamente iguales se obtuvo de la tabla lo siguiente.

$$\text{Cable Primario} = \# 10$$

$$\text{Cable Secundario} = \# 10$$

8- Vueltas por capa del devanado primario.

Esto significa que necesitamos saber si las 298 vueltas de calibre # 10 quedan en la columna central del núcleo, para esto necesitamos conocer el diámetro del conductor y la longitud del núcleo.

$$\text{Cable Primario} = \# 10, \text{ diámetro} = 2.59 \text{ mm}$$

$$\text{Longitud de la columna central} = 127 \text{ mm}$$

$$N_{VCN} = L_{CN} / \text{diámetro} = 127 \text{ mm} / 2.59 \text{ mm} = 49 \text{ vuelt/ capa.}$$

9- Numero de capas del devanado primario.

Son 298 vueltas totales.

Son 49 vueltas por capa.

# de capas = # de vueltas totales / # vueltas por capa

# de capas =  $298 / 49 = 6$  capas de devanado primario.

El numero de capas del devanado secundario es igual a 6 capas.

10- El siguiente paso sera: Averiguar si todas estas capas de los datos anteriores van a caber en las ventanas del núcleo.

6 capas de primario y 6 capas de secundario, son un total de 12 capas.

El espesor de cada devanado:

Espesor primario =  $6(2.59) = 15.52$

Espesor secundario =  $6(2.59) = 15.52$ .

11- Las 12 capas tienen un espesor:

$C_p = 16$  mm

$C_s = 16$  mm

A esto hay que añadirle el espesor del cartón aislante de separación de devanados son dos capas por lo tanto es 2mm.

Disponemos de 42 mm.

$C_p = 16$  mm

$C_s = 16$  mm

Capa de aislante = 2 mm

-----

= 34 mm

Por lo tanto las doce capas quedan bien y sobran 8 mm.

12- En las siguientes figuras se puede observar el proceso de construcción de este transformador.



Figura 1. Herramienta y materiales utilizados para la construcción.



Figura 2. Proceso de construcción del transformador



Figura 3. Transformador terminado y barnizado