

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON  
FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA  
Y ELECTRICA  
DIVISION DE ESTUDIOS DE POSTGRADO



METODO PARA EVALUAR LA CALIDAD DEL  
AISLAMIENTO EN TERMINALES DE MEDIA  
TENSION A PARTIR DE PRUEBAS DE HI-POT

POR

ING. JESUS ROBERTO MARTINEZ RODRIGUEZ

TESIS

EN OPCION AL GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS  
DE LA INGENIERIA ELECTRICA CON  
ESPECIALIDAD EN CONTROL

SAN NICOLAS DE LOS GARZA, N. L.

DICIEMBRE DE 2002

TM

Z5853

.M2

FIME

2002

.M377

WELIKUMU PAKSA  
BY ALUAK LAA  
CAALU ADI LAM.

AISLAMMENTO EN  
TERMINALES DE  
MEDIA

TEENSIOWA PARTIR  
DE PRUEBAS DE  
HI-POT

J. R. W. R.

2002



1020149198

**UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON**  
**FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA**  
**Y ELECTRICA**  
**DIVISION DE ESTUDIOS DE POSTGRADO**



**METODO PARA EVALUAR LA CALIDAD DEL**  
**AISLAMIENTO EN TERMINALES DE MEDIA**  
**TENSION A PARTIR DE PRUEBAS DE HI-POT**

**POR**

**ING. JESUS ROBERTO MARTINEZ RODRIGUEZ**

**TESIS**

**EN OPCION AL GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS**  
**DE LA INGENIERIA ELECTRICA CON**  
**ESPECIALIDAD EN CONTROL**

**SAN NICOLAS DE LOS GARZA, N. L.**

**DICIEMBRE DE 2002**



GGNOR  
21287

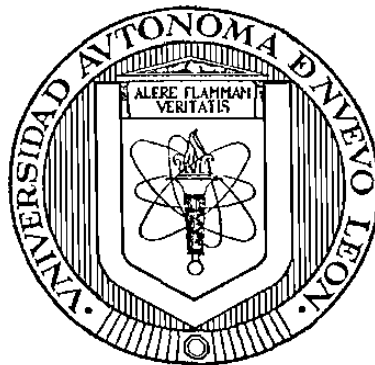
980 998

TM  
Z5853  
.M2  
FLME  
2002  
.M377



FONDO  
TESIS

**UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON**  
**FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA**  
**DIVISION DE ESTUDIOS DE POST-GRADO**



**METODO PARA EVALUAR LA CALIDAD DEL AISLAMIENTO EN  
TERMINALES DE MEDIA TENSION A PARTIR DE PRUEBAS DE  
HI-POT**

**POR**

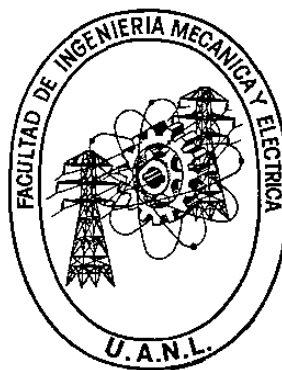
**ING. JESUS ROBERTO MARTINEZ RODRIGUEZ**

**TESIS**

**EN OPCION AL GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS DE LA  
INGENIERIA ELECTRICA CON ESPECIALIDAD EN CONTROL**

**SAN NICOLAS DE LOS GARZA, N.L.  
DICIEMBRE DE 2002**

**UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON**  
**FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA**  
**DIVISION DE ESTUDIOS DE POST-GRADO**



**METODO PARA EVALUAR LA CALIDAD DEL AISLAMIENTO EN  
TERMINALES DE MEDIA TENSION A PARTIR DE PRUEBAS DE  
HI-POT**

**POR**

**ING. JESUS ROBERTO MARTINEZ RODRIGUEZ**

**TESIS**

**EN OPCION AL GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS DE LA  
INGENIERIA ELECTRICA CON ESPECIALIDAD EN CONTROL**

**SAN NICOLAS DE LOS GARZA, N.L.  
DICIEMBRE DE 2002**

Universidad Autónoma de Nuevo León  
Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica  
División de Estudio de Post-grado

Los miembros del comité de tesis recomendamos que la tesis **"Método para evaluar la calidad del aislamiento en terminales de media tensión a partir de las pruebas de Hi-Pot"** realizada por el alumno Ing. Jesús Roberto Martínez Rodríguez, matrícula 633041, sea aceptada para su defensa como opción al grado de Maestro en Ciencia de la Ingeniería Eléctrica con especialidad en Control.

El Comité de Tesis

Dr. Ernesto Vázquez Martínez  
Asesor

Dr. Fernando M. Betancourt Ramírez  
Coasesor

Dr. Arturo Conde Enríquez  
Coasesor

Dr. Guadalupe Alan Castillo Rodríguez  
División de Estudios de Post-grado

San Nicolás de los Garza, N L.  
Diciembre de 2002



# DEDICATORIA

A mis hijas Mariana y Paulinna que son el amor de mi vida

A mi esposa, que tanto la quiero y que ha estado a mi lado en todo momento que la he necesitado

A mi madre querida que me ha ayudado siempre y se esforzó por pagarme el inicio de mi maestría.

# **AGRADECIMIENTO**

Al mi asesor el Dr. Ernesto Vázquez, quien me apoyo en todo momento en mi tesis, su aporte en conocimientos y experiencias fue fundamental para el desarrollo de la tesis.

Al Ing. Juan Carlos Ruiz de Condomex, por proporcionarme información importante que me ayudo en el desarrollo esta tesis.

## PROLOGO

En los últimos 5 años de mi trayectoria profesional, he vivido el creciente desarrollo de nuevas instalaciones subterráneas y conversiones de viejas instalaciones aéreas a subterráneas, por lo que me nace profundizar sobre este tema, su pasado, su presente y su futuro.

Las instalaciones subterráneas son conocidas en México desde principios de siglo, en las calles de Guatemala y Argentina en el D.F. fueron encontrados cables enterrados en el año de 1901. Las bóvedas para instalar equipos y transformadores sumergibles más antiguas datan de 1910, año en que se contaba con algunas áreas de distribución subterránea en el centro de las ciudades de Veracruz, Puebla y Monterrey.

En el año de 1950 se contaba con cables subterráneos en el primer cuadro de la ciudad de México con una capacidad instalada de 58,110 kVA. Alrededor del mismo año se construyeron algunas áreas, en ciudades de provincia, en donde únicamente el secundario y las acometidas eran subterráneas; el cable primario y los transformadores aéreos

En 1969 se planeó la construcción de un área residencial con campo de golf en la ciudad de Guadalajara y en las que los inversionistas requirieron que toda la instalación eléctrica fuera subterránea. Esta fue el primer área residencial en México completamente subterránea y construida con los desarrollos mas recientes en equipo y materiales en este campo. El costo de esta instalación fue lo suficientemente adecuada como para empezar a pensar en construir las nuevas áreas residenciales con instalaciones eléctricas totalmente subterráneas.

En lo que respeta a distribución comercial subterránea trifásica, desde 1968, se empezaron a reconstruir algunos sistemas ya viejos y obsoletos, como por ejemplo, en las ciudades de Veracruz (14,000 kVA), Puebla (12,000 kVA), Monterrey (20,000) y Tampico (10,500). También se empezó la conversión de alimentadores aéreos a subterráneos en las ciudades de Guadajara (49,000 kVA), León (3,000 kVA) y Minatitlan (3,600 kVA).

En esta época 1971, es cuando las instalaciones han tenido un desarrollo de forma casi explosiva, con 402,800 kVA instalados en el sistema subterráneo en la ciudad de México con un incremento del 320% en 11 años.

En lo concerniente a la construcción de nuevas áreas residenciales, comerciales, hoteleros etc. La práctica actual en la ciudad de México, puertos y ciudades turísticas del país es que tengan sistemas subterráneos.

Una de las principales razones por las que existe un aumento en la construcción de sistemas subterráneos es que se ha podido llegar mediante equipo adecuado y filosofías, a un costo razonable en comparación con las instalaciones aéreas.

Entonces, como se observa, las redes subterráneas presentan un crecimiento importante, pero este se ha visto limitado por diversos paradigmas.

Con respecto a estos sistemas de distribución se presentan los siguientes problemas a vencer para lograr un mayor desarrollo.

- a) Problemas técnicos como son el manejo de grandes cantidades de energía con mayor confiabilidad, continuidad y mínimo de mantenimiento.
- b) Problemas urbanistas referentes al mejoramiento del aspecto y belleza de ciudades, puertos turísticos y centros históricos.
- c) Y hasta el año pasado la falta de difusión y promoción en general para impulsar este tipo de instalaciones, y este es de relevancia, para resaltar las ventajas que conllevan las redes subterráneas sobre las aéreas, entre otras la plusvalía de las casa habitación.

Cabe mencionar que desde el año pasado, Comisión Federal de Electricidad esta recomendando y en muchas ocasiones exigiendo la instalación subterránea en su totalidad, o por lo menos una instalación hibrida. Actualmente en Monterrey el porcentaje de instalaciones subterráneas es aproximadamente tan solo del 5% contra un 95% de instalaciones aéreas.

En la medida en que el cable de potencia tenga mas demanda por parte de la industria, contratistas y CFE, será mas la necesidad de instalar la terminal de media tensión como accesorio del cable de potencia. Y entonces también será importante que los ingenieros de campo estén mas involucrados y capacitados en la pruebas para verificar la confiabilidad del sistema (terminal y cable)

# INDICE

<b>Capitulo</b>	<b>Pagina</b>
Síntesis	1
1 Introducción	4
1.1 Descripción del problema	6
1.2 Objetivo de la tesis	6
1.3 Hipótesis	6
1.4 Límites	6
1.5 Justificación del trabajo	6
1.6 Metodología	7
2 Terminales y Empalmes en cables de potencia	8
2.1 Introducción	8
2.2 Teoría de Cables	9
2.2.1 Conductor	12
2.2.2 Aislamiento	14
2.2.3 Pantallas Eléctricas	16
2.2.3.1 Pantalla sobre el conductor	17
2.2.3.2 Pantalla sobre el aislamiento	19
2.2.4 Cubierta	19
2.2.5 Capacitancia y reactancia capacitiva	20
2.3 Teoría de terminales y empalmes	22
2.3.1 Función de la terminal	22

2.3.2 Clasificación de terminales	23
2.3.3 Función del empalme	24
2.3.4 Tipos de terminales y empalmes	24
2.3.4.1 Terminales y empalmes encintados	24
2.3.4.2 Terminales y empalmes contráctiles en frío	25
2.3.4.3 Terminales y empalmes termocontráctiles	25
2.3.4.4 Terminales y empalmes premoldeados	26
3 Prueba de Hi-Pot	27
3.1 Introducción	27
3.2 Prueba de Hi-Pot	28
3.2.1 Conexión	29
3.2.2 Evaluación de resultados	32
3.3 Valor de aislamiento (resistencia)	33
3.4 Análisis de resultados de la prueba de Hi-Pot	34
4 Método de análisis de las Pruebas de Hi-Pot	39
4.1 Introducción	39
4.2 Tipos de pruebas	42
4.3 Componentes de la corriente de fuga	43
4.4 Conductancia	45
4.5 Algoritmo para pronosticar la falla de aislamiento	46
4.5.1 Problemas de Implementación	53
4.6 Método alternativo (SIMFIT)	54
4.6.1 Ajuste a funciones exponenciales	54
4.6.2 Implementación método alternativo	56

<b>5 Validación de Resultados</b>	<b>58</b>
5.1 Introducción	58
5.1 Caso 1, planta generadora de energía	59
5.2 Caso 2, planta refinería	61
5.4 Caso 3, terminal con cable dañado	66
<b>6.- Conclusiones y Recomendaciones</b>	<b>70</b>
6.1 Introducción	70
6.2 Aportaciones	73
6.3 Recomendaciones para trabajos futuros	73
Bibliografía	75
Listado de Figuras	76
Listado de Tablas	77
Listado de Gráfica	78
Resumen Autobiográfico	79



## SINTESIS

El objetivo de mi tesis es la elaboración de una herramienta de soporte para los ingenieros, de la industria o contratistas para determinar el estado de las terminales y empalmes antes de ser energizadas. La prueba que se realiza es la de Hi-Pot y que consiste en aplicar seis inyecciones de un alto voltaje de corriente directa, en intervalos de aproximadamente un minuto; la variable observada es la corriente fuga. Los valores de voltaje están definidos por las normas de cada país, en nuestro caso la NOM ("Norma Oficial Mexicana"). La falta de experiencia en dicha prueba deriva un desconocimiento en la interpretación de la corriente de fuga y trae como consecuencia la falla de la terminal ó empalme en un corto o mediano plazo, cuando su tiempo de vida debe ser la del cable (25 años aproximadamente).

En el capítulo 2, se establecen las bases de la teoría de cables de media tensión (considerando media tensión de 1kV hasta 46 kV). Se definió la función primordial del cable, así como la función de cada una de los elementos que lo constituyen. Se explicó los diferentes tipos de cables, y sus aplicaciones.

También se establecen las bases de la teoría de terminales y empalmes. La clasificación de terminales y empalmes, las diferentes tecnologías existentes; las ventajas y desventajas de cada una de ellas.

En el capítulo 3, se estudió a detalle el problema para verificar la operatividad de accesorios antes mencionados mediante la prueba de Hi-pot. Se analizó el procedimiento de evaluación y resultados de las pruebas para uniformizar criterios de distintas personas expertas en el medio, considerando también lo establecido por diferentes corporaciones tales como la Norma Mexicana, Comisión Federal de Electricidad etc. También se mostró la conexión de una terminal, así como su circuito equivalente, el análisis de las componentes de la corriente de fuga.

El gran problema es la falta de experiencia para interpretar los valores de corriente de fuga, esto debido a que pocas personas realizan la prueba de Hi-Pot por que no son exigidas en algunos de los casos y la otra porque no todos los Instaladores Contratistas o Industrias cuentan con el aparato que es muy costoso. Es aquí en donde el trabajo de la tesis esta enfocado, una herramienta que supla esta falta de experiencia.

En el capítulo 4 se explica el diseño de una modelación matemática teniendo como base el análisis del circuito eléctrico. En donde se desarrolló un algoritmo en el cual las variables que nos ayudaron a determinar el estado de la terminal fueron la conductancia y la corriente de fuga.

En el capítulo 5, se probó el diseño con tres casos diferentes, dos de ellos de campo recolectado de importantes industrias, y una que se efectuó especialmente para prueba de este diseño. También se identificaron problemas en la implementación, lo que nos orillo a considerar una segunda opción, la cual nos ayudo en la comparación de resultados. Esta segunda opción fue un software estadístico llamado SIMFIT, el cual corroboró los resultados del modelo matemático en una de las etapas que tuvimos problemas de implementación.

En el capítulo 6, se mencionan las conclusiones en general de esta tesis, así como las recomendaciones para trabajos futuros.

# 1 INTRODUCCIÓN

## 1.1 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

En las instalaciones de terminales de cables de potencia de media tensión, se requiere verificar que la instalación y operación de la terminal (cono de alivio) sea la correcta antes de ser energizada; para esto se realiza una prueba de dieléctrico utilizando el Hi-Pot.

La prueba de Hi-Pot consiste en aplicar un voltaje de corriente directa a la terminal en 6 intervalos, los valores dependen del voltaje nominal de la terminal y se obtiene una lectura de corriente de fuga en micro amperes, la gráfica voltaje vs corriente que se obtiene es la curva de Hi-Pot. Se requiere de una persona con mucha experiencia para interpretar el comportamiento de los resultados de una prueba y así dictaminar el estado de la terminal. En algunas ocasiones esta prueba no se realiza debido al desconocimiento sobre la interpretación de la curva, y trae como consecuencia la falla de la terminal en un corto o mediano plazo.

Una variedad de aparatos y procedimiento de pruebas han sido utilizados en un esfuerzo para determinar la calidad del aislamiento. Aunque varios

métodos y aparatos de prueba usan voltaje *dc*, sin embargo los antecedentes indican limitaciones en la utilización de este tipo de señal de voltaje.

Las principales limitaciones se exponen a continuación.

No hay correlación reconocida entre la fuerza *ac* del aislamiento y la prueba de voltaje en *dc*. Estos niveles de prueba son principalmente experimentales.

Segundo, para un cable envejecido la prueba de voltaje de *dc* puede dañar el aislamiento. Cuando posteriormente se aplica *ac* el aislamiento fallará en un nivel más bajo que si éste no se hubiera sometido a la prueba de *dc*. Algunos datos indican que la vida del cable debe ser 5 veces más que si éste no se hubiera probado con *dc*.

Tercero, si un arco eléctrico ocurre durante la ruptura del aislamiento el esfuerzo del voltaje causa transitorios los cuales pueden degradar el resto del aislamiento. El reflejo de la ondulación duplicará el máximo voltaje, el cual puede causar daño o fallas múltiples a lo largo del cable.

Finalmente se requiere una prueba de voltaje más alta de *dc* que para operaciones de *ac*. La corriente de *dc* permite la formación de cargas en los vacíos del aislamiento. El campo eléctrico necesario para vencer esta carga es sumada al campo necesario para la ruptura del aislamiento.

$$E_{\text{total}} = E_{\text{vacío}} + E_{\text{aislamiento}}$$

El campo eléctrico nominal de *ac* en un aislamiento para 5 kV, 90,000 mil conductor es 55 volt/mil. El campo necesario de *dc* para un arco eléctrico en el aislamiento debe ser 10 veces mayor. Estos altos esfuerzos inusuales causan deterioro en el aislamiento, y su ruptura posteriormente con la fuerza de *ac*.

A pesar de todas las limitaciones antes mencionadas, si una prueba de campo es realizada el método de prueba de *dc* es la elección. Sin embargo

aunque otros métodos se muestran prometedores en este momento sus limitaciones exceden sus ventajas persivibles.

## **1.2 OBJETIVO DE LA TESIS**

Diseñar un método matemático que interprete la curva Hi-Pot para determinar el estado (segura / insegura) de una terminal instalada.

## **1.3 HIPÓTESIS**

Diseñar un método que me permita suplir la experiencia de una persona, utilizando una modelacióm matemática.

## **1.4 LÍMITES**

La prueba Hi-Pot se aplica a cables, empalmes y terminales, sin embargo para este trabajo solo se considera el análisis de terminales. No se desarrollarán aplicaciones en "software" y se utilizará el programa de excel para la obtención de resultados.

## **1.5 JUSTIFICACIÓN DEL TRABAJO**

Proporcionar una herramienta de apoyo para la verificación de las terminales para personas con poca experiencia en este tipo de pruebas, a que

permita el número de verificaciones, por las Unidades Verificadoras antes de energizar una terminal en un el sistema industrial de media tensión.

## 1.6 METODOLOGÍA

1) Estudio del problema para verificar la operatividad de las terminales en un sistema eléctrico.

2) Análisis de los procedimientos de obtención de las curvas de Hi-Pot, y los criterios de evaluación utilizados.

3) Programar reuniones de trabajo con ingenieros de campo para establecer los criterios prácticos y casos críticos que determinan si la instalación de terminales es correcta a partir de los datos de la curva de Hi-Pot.

4) Recopilar estos mismos criterios a partir de referencias bibliográficas; el objetivo es obtener un conjunto de criterios estándares, con una mínima ambigüedad.

5) Diseñar un modelo matemático que determine en forma automática si la instalación de terminales es correcta.

6) Realizar pruebas utilizando registros de curvas de Hi-Pot, a fin de validar los resultados del modelo matemático.

## **2 TERMINALES Y EMPALMES EN CABLES DE POTENCIA**

### **2.1 INTRODUCCIÓN**

Los cables de potencia son parte de los elementos de un sistema eléctrico de potencia, que al igual que los circuitos aéreos tiene como función la transmisión de energía eléctrica. Debido a su diseño, los cables son conectados a otros equipos (transformadores, interruptores, circuitos aéreos, etc) mediante terminales. Estos accesorios deben ser diseñados, fabricados e instalados en forma rápida y eficiente para asegurar un período prolongado de vida útil en beneficio de la continuidad del servicio.

En este capítulo se hace una breve descripción de los cables de potencia y sus características de diseño. Así mismo se analizan las funciones y tipos de terminales y empalmes utilizados actualmente en cables de potencia.



## 2.2 TEORÍA DE CABLES

La función primordial de un cable de energía aislado es la de transmitir energía eléctrica a una corriente y tensión preestablecidas, durante cierto tiempo. Es por ello que sus elementos constitutivos primordiales deben estar diseñados para soportar el efecto combinado producido por estos parámetros.

Los elementos que constituyen la estructura básica del cable son: el conductor, el aislamiento, las pantallas (semiconductoras y metálicas) y la cubierta. Los cables pueden ser unipolar o tripolar, pero en general su construcción es la misma.

En la Fig. 2.1 se indican las partes de las que consta un cable de potencia.

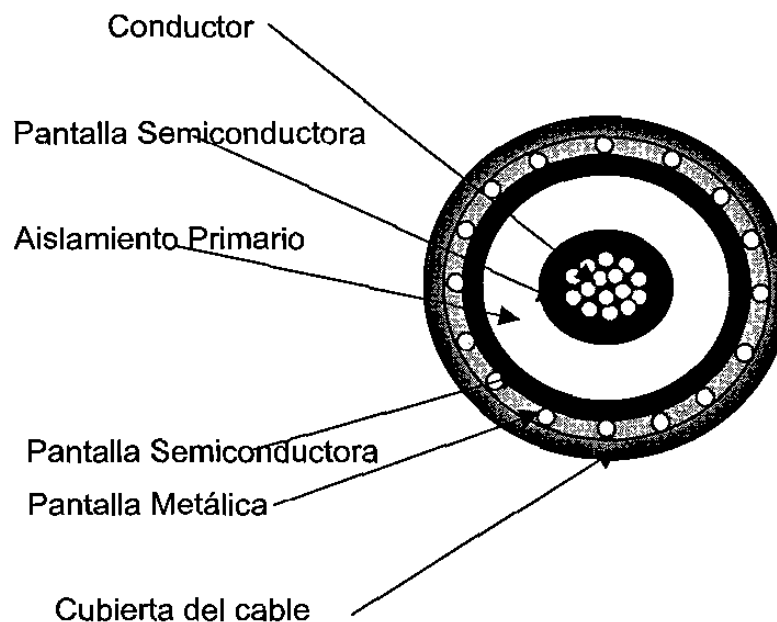


Fig. 2.1a Estructura básica de un cable (corte transversal).

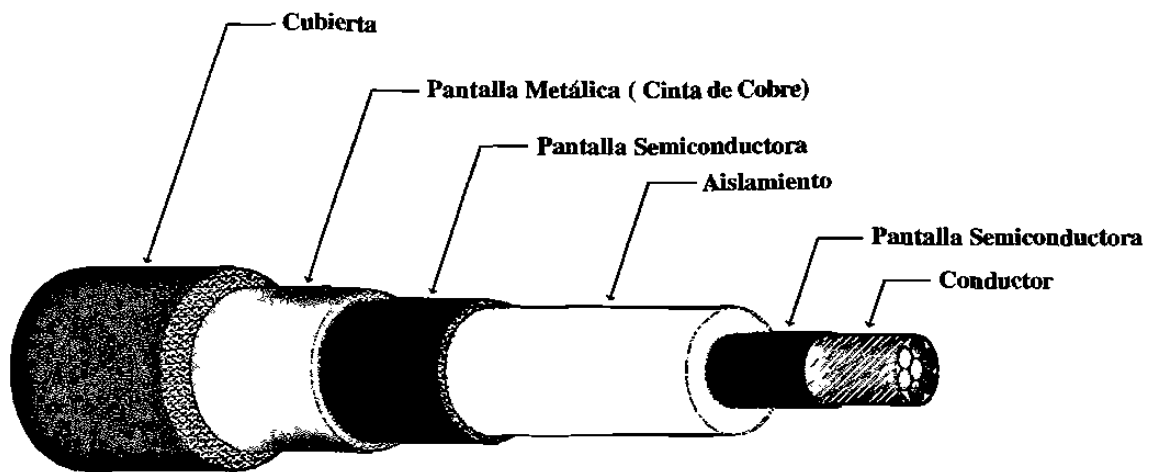


Fig. 2.1b Estructura básica de un cable con pantalla metálica de cintas.

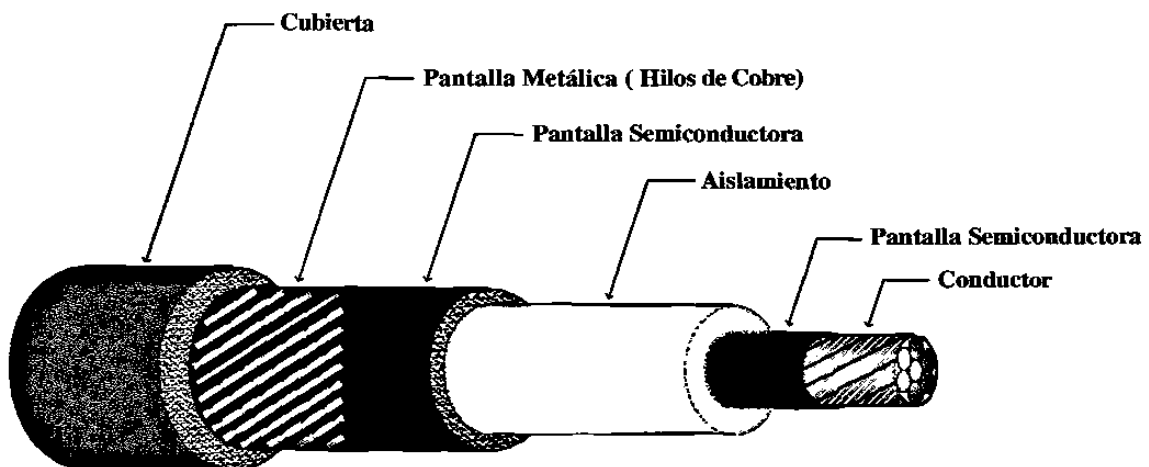


Fig. 2.1c Estructura básica de un cable con pantalla metálica de hilos.

a) DS – Distribución Subterránea; utilizado en la industria en general y zonas comerciales.

b) DRS – Distribución Residencial Subterránea; utilizado en redes de distribución subterránea en zonas residenciales.

c) Cubierta de plomo; utilizado en refinerías y plantas petroquímicas.

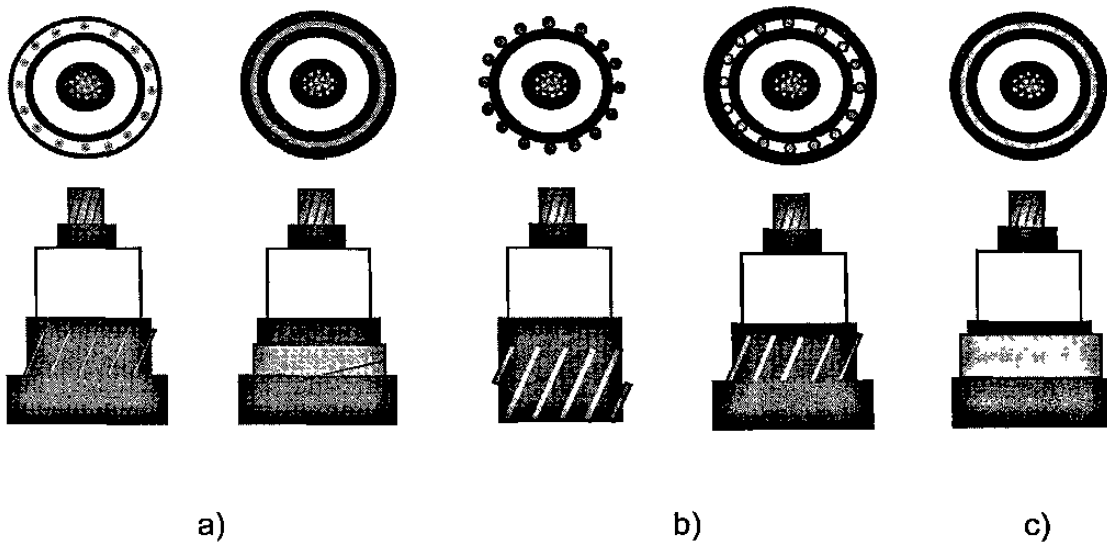


Fig. 2.2 Estructura de tres tipos de cables a) Distribución Subterránea con pantalla de hilos ó cintilla de cobre, b) Distribución Residencial Subterránea de hilos gruesos con o sin cubierta, c) Con pantalla de plomo.

Un cuarto tipo de cable es el de Papel impregnado en aceite que contiene un forro de plomos que garantiza su hermeticidad contra la entrada de humedad. Desde finales del siglo XX ha sido el aislamiento de la mayoría de los cables, que hasta la fecha siguen operando en algunos circuitos de la Ciudad de México. Actualmente solo la compañía de Luz y Fuerza del Centro sigue utilizando este tipo de cable.

## 2.2.1 CONDUCTOR

Su función es la de transmitir la corriente a través del cable y dar resistencia a la tracción. Las cuatro características del conductor son el tipo de materiales, la flexibilidad, la forma y las dimensiones.

Los materiales más usados como conductores eléctricos son el cobre y el aluminio, aunque el primero es superior en características eléctricas y mecánicas (la conductividad del aluminio es aproximadamente el 60% de la del cobre y su resistencia a la tensión mecánica el 40%), las características de bajo peso del aluminio han dado lugar a un amplio uso de este metal en la fabricación de cables aislados y desnudos. En la Tabla 2.1 se indican las propiedades de los materiales empleados como conductores en cables.

Metal	Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	Temperatura de fusión (°C)	Coefficient e lineal de dilatación (x10 <sup>-6</sup> /°C)	Resistividad eléctrica 20°C (Ω-mm <sup>2</sup> /km)	Coef. térm. de resistiv. Eléctrica (1/°C)	Conductividad eléctrica (%IACS*)
Aluminio	2.7	660	24	25.264	0.00403	61.0
Cobre duro	8.89	1083	17	17.922	0.002383	96.2
Cobre suave	8.89	1083	17	17.241	0.00393	100.0

Tabla 2.1 Propiedades de los materiales empleados como conductores.

La flexibilidad de un conductor se logra de dos maneras, recociendo el material para suavizarlo o aumentando el número de alambres que lo forman. La operación de reunir los cables da lugar a diferentes flexibilidades, de acuerdo con el número de alambres, el paso o longitud del torcido de agrupación y el tipo de cuerda.

Las formas de los conductores de uso más general en cables de media tensión son: la Redonda (normal ó compacto) y el Sectorial.

La escala más usada para los calibres en los Estados Unidos es la "American Wire Gage" (AWG), misma adoptada en México. La escala se formo fijando dos diámetros y estableciendo una ley de progresión geométrica para diámetros intermedios. Los diámetros base seleccionados son 0.46 pulgadas (calibre 4/0) y 0.0050 (calibre 36) y hay 39 dimensiones entre estos dos. Es decir:

$$\sqrt[39]{\frac{0.4600}{0.0050}} = \sqrt[39]{92} = 1.229$$

$$\therefore D_n = 1.229^n \times D_o$$

Donde  $D_o = 0.127\text{mm}$  (0.005 in) y  $D_n$  = el enésimo calibre de la escala y "n" va desde 0 a 39.

Para secciones superiores a 4/0 se define el cable directamente por su diámetro o área. La unidad es el Circular Mil que representa el área del círculo de un mil de diámetro. Las siglas son MCM o KCM que equivale a mil circular mils.

La escala de la IEC ("International Electrotechnical Comisión") es la más usada en la actualidad con excepción de los Estados Unidos y países latinoamericanos. La escala consiste en proporcionar la medida directa de área transversal de los calibres en milímetros cuadrados. En el caso de México, el uso de la escala IEC se limita a la Compañía de Luz y Fuerza del Centro.

En la Tabla 2.2 se muestran por orden de tamaño las escalas antes mencionadas con su área de la sección transversal en milímetros cuadrados, el número de alambres que comercialmente se colocan así como su diámetro exterior nominal en milímetros (todo para construcción con cableado redondo compacto):

mm <sup>2</sup>	AWG o MCM	Area de la seccion transversal en mm <sup>2</sup>	No. de alambres	Diám. Ext. nominal mm.
	8	8.37	7	3.4
	6	13.3	7	4.29
	4	21.15	7	5.41
	2	33.6	7	6.81
	1	42.4	19	7.59
50		48.3	19	8.33
	1/0	67.4	19	8.53
	2/0	67.4	19	9.55
70		69	19	9.78
	3/0	85.0	19	10.74
	4/0	107.2	19	12.06
	250	126.7	37	13.21
150		147.1	37	14.42
	300	152.0	37	14.48
	350	177.3	37	15.65
	400	203	37	16.74
240		239	37	18.26
	500	253	37	18.69
	600	304	61	20.6
	750	380	61	23.1
	800	405	61	23.8
	1000	507	61	26.9

Tabla 2.2 Calibres de los conductores.

### 2.2.2 AISLAMIENTO

La función del aislamiento es confinar la corriente eléctrica en el conductor y contener el campo eléctrico dentro de su masa. En ese sentido los factores que deben ser considerados en la selección de los aislamientos son las características eléctricas y mecánicas del material.

Los aislamientos se pueden dividir en dos grupos principales, los de papel impregnado y los de tipo seco. A continuación se describen sus características.

De papel impregnado. En este caso se emplea un papel especial obtenido de pulpa de madera, formado con celulosa de fibra larga. El cable aislado con papel sin humedad se impregna con una sustancia para mejorar las características del aislante. Las sustancias más usuales son: el aceite viscoso, el aceite viscoso con resinas refinadas, el aceite viscoso con polímeros de hidrocarburos, aceite de baja viscosidad y las parafinas microcristalinas del petróleo. La selección de cualquiera de estas sustancias dependerá de la tensión y de la instalación del cable. El compuesto ocupa todos los intersticios, eliminando las burbujas de aire en el papel y evitando la ionización en servicio.

Aislamientos de tipo seco. En este tipo se utilizan compuestos cuya resina base se obtiene de la polimerización de determinados hidrocarburos y se clasifican en termoplásticos y termofilos

Los termoplásticos son aquellos que al calentarse, su plasticidad permite conformarlos a voluntad, recuperando sus propiedades iniciales al enfriarse, pero manteniendo la forma que se les imprimió. Por otra parte los termofilos a diferencia de los anteriores, después de un proceso inicial similar al anterior, los subsecuentes calentamientos no los reblandecen.

El hule etileno propileno (EP) y el polietileno de cadena cruzada (XLP) son los principales materiales empleados en la actualidad para cables de energía con aislamiento extruido.

La presencia de arborescencias (degradación del material por el constante paso de corriente debido a la formación de caminos conductivos) en el aislamiento son causadas por tres factores, el agua en el aislamiento, la tensión aplicada de CA y las irregularidades (cavidades, impurezas, protuberancias en las pantallas semiconductoras). En general, la presencia de estos tres factores causan una disminución en la vida del cable y es más pronunciada para el XLP que para el EP.

El espesor del aislamiento es determinado por la tensión entre fases y las características del sistema. Generalmente se especifica el nivel de voltaje que el cable puede soportar durante cierto tiempo, en la norma ANSI/IEEE se establece el porcentaje de nivel de aislamiento y los cables se subdividen en: a)

100%: Cables que no pueden operar más de un minuto con falla a tierra en el sistema. b) 133%: Cables que no pueden operar mas de una hora con falla a tierra en el sistema. c) 173%: Cables que puede operar mas de una hora con falla a tierra; en este caso el aislamiento del cable está diseñado para soportar continuamente el voltaje de línea del sistema.

### **2.2.3 PANTALLAS ELÉCTRICAS**

Cuando se aplica una tensión entre un conductor eléctrico y el plano de tierra (o entre 2 conductores), el dieléctrico intermedio se somete a esfuerzos eléctricos. Estos esfuerzos, si son de magnitudes elevadas, pueden producir deterioro del material del dieléctrico y producir efectos indeseables al no controlarse en forma adecuada. El control de estos esfuerzos se logra mediante el uso de las pantallas eléctricas. Estas se aplican en los cables de energía con el fin de confinar en forma adecuada el campo eléctrico a la masa de aislamiento del cable.

Uno de los principios básicos de los campos eléctricos es que al aplicar una tensión a dieléctricos colocados en serie, con una diferente permitividad,  $K_1 \neq K_2$ , se dividirá en razón inversa a las permitividades relativas de ambos materiales. Por lo tanto, la pantalla permite crear una distribución radial y simétrica de los esfuerzos eléctricos en la dirección de máxima resistencia del aislamiento.

Los cables de energía, bajo el potencial aplicado, quedan sometidos a esfuerzos eléctricos radiales, tangenciales y longitudinales. Los esfuerzos radiales están siempre presentes en el aislamiento de los cables energizados. El aislamiento cumplirá su función en forma eficiente si el campo eléctrico se distribuye uniformemente. Los esfuerzos tangenciales están asociados con campos radiales no simétricos y ocurren en cables multiconductores, cuando



cada uno de los conductores no está apantallado, y en cualquier cable monopolar sin pantalla. Por lo contrario, los esfuerzos longitudinales no necesariamente están asociados con campos radiales asimétricos y siempre los están con presencia de tensiones superficiales en lo largo del cable. Adicionalmente, la pantalla provee al cable de una capacitancia a tierra uniforme. Los cables que se instalan en ductos o directamente enterrados, por lo general pasarán por secciones de terreno húmedo y seco o ductos de características eléctricas variables. Esto da como resultado una capacitancia a tierra variable y, como consecuencia, una impedancia no uniforme. Otra de las aplicaciones de las pantallas es reducir el peligro de descargas eléctricas al personal o en presencia de productos inflamables; en cables sin pantalla como la superficie externa del aislamiento de los cables no está en contacto con tierra a lo largo de la trayectoria de instalación, se puede presentar una diferencia de potencial considerable entre la cubierta de cable y tierra.

Las pantallas en los cables de energía pueden ser, dependiendo de su localización y función, de dos tipos; a) pantalla semiconductor sobre el conductor y b) pantalla sobre el aislamiento.

### **2.2.3.1 PANTALLA SOBRE EL CONDUCTOR**

En circuitos con tensiones de 2 kV y mayores se utiliza la pantalla semiconductor a base de cintas o extruída. Los materiales de la pantalla depende del diseño del cable, ya que en cables con aislamiento de papel impregnado se usan cintas de papel CB (Carbon Black), en cables con aislamiento sólido se utilizan pantallas extruídas del material compatible con el aislamiento.

La función básica de este tipo de pantallas es la de evitar concentraciones de esfuerzos eléctricos que se presentan en los hilos del conductor. La inclusión de este elemento en el diseño del cable es con el fin de

obtener una superficie equipotencial uniforme, a la cual las líneas de fuerza del campo eléctrico sean perpendiculares.

Otra función es evitar ionización en los intersticios entre el conductor y el aislamiento, Si el aislamiento fuera extruido directamente sobre el conductor. La curvatura de los alambres de la corona superior darían lugar a la formación de burbujas de aire que, al estar sujetas a una diferencia de potencial provocaría la ionización del aire con el consiguiente deterioro del aislamiento. La situación anterior se elimina al colocar la pantalla semiconductora, la cual presenta una superficie uniforme (ver Fig 2.3).

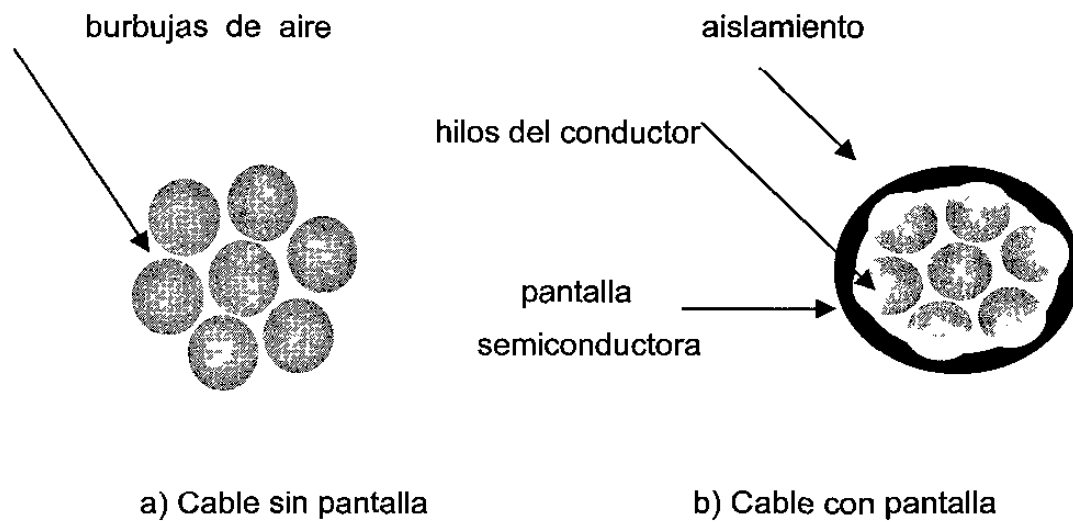


Fig. 2.3 Formación de una superficie equipotencial uniforme mediante uso de una pantalla semiconductora.

### **2.2.3.2 PANTALLAS SOBRE EL AISLAMIENTO (ELECTROSTÁTICA)**

En cables de 5 kV y mayores se utilizan la pantalla electrostática sobre el aislamiento que esta conformada de una pantalla Semiconductora y una pantalla Metálica.

La pantalla electrostática sobre el aislamiento seco, puede estar constituida por una capa de materiales termoplástico o termofijo semiconductor, o bien, por cinta semiconductora y/o barniz semiconductor. Para cables con papel impregnado en aceite se emplean cintas de papel CB (Carbon Black) semiconductoras.

La pantalla metálica puede constar de alambres, cintas planas o corrugadas o combinación de alambres y cintas. En le caso de los cables aislados con papel la cubierta de plomo hace la veces de la pantalla. El diseño de la pantalla metálica se debe efectuar de acuerdo al propósito de diseño, que puede ser para propósito electrostrático, para conducir corriente de falla y como pantalla neutro.

### **2.2.4 CUBIERTA**

La función primordial de las cubiertas en sus diferentes combinaciones es la de proteger al cable de los agentes externos del medio ambiente que lo rodea, tanto en la operación, como en la instalación del cable.

Los tipos de cubiertas más utilizados son los siguientes:

- a) Metálicas. El material normalmente usado es el plomo y sus aleaciones, y en una escala menor el aluminio.
- b) Termoplásticas. Las más usuales son fabricadas con PVC (cloruro de polivinilo) y polietileno de alta y baja densidad.
- c) Elastoméricas. Básicamente se utiliza el neopreno (policloropreno) y el Hypalon (polietileno clorosulfonado)
- d) Cubiertas textiles. Se emplea una combinación de yute impregnado en asfalto y recubierto con baño final de cal y talco, con el fin de evitar que se adhieran las capas adyacentes

Para definir el material de la cubierta es necesario conocer los agentes externos a que pueden quedar expuestos los cables de energía en el medio ambiente (térmicas, químicas y mecánicas). En general la cubierta mas común es la de PVC.

## 2.2.5 CAPACITANCIA Y REACTANCIA CAPACITIVA

La capacitancia entre dos conductores se define como razón de la carga entre los conductores a la diferencia de potencial aplicada entre ellos:

$$G = \frac{q}{v}$$

donde  $q$  es la carga entre los conductores en coulombs por kilómetro y  $v$  es la diferencia de potencial

En el caso de cables aislados el cálculo de la capacitancia depende de su construcción, si es monopolar o tripolar.

En el caso del cable monopolar con pantalla metálica, el cable representa un capacitor en el que el conductor, que se encuentra al potencial de línea, constituye una de las placas y la pantalla o cubierta metálica, que está a tierra, constituye la otra placa. Por último el dieléctrico lo constituye el propio aislamiento.

Para este tipo de cables la capacitancia es:

$$C = \frac{0.0241 SIC \times 10^{-6}}{\text{Log}(da/de)} \text{ F/km}$$

Donde  $SIC$  es la constante inductiva específica del aislamiento,  $da$  es el diámetro sobre el aislamiento y  $de$  es el diámetro bajo el aislamiento

En el caso de un cable tripolar con cubierta común, la capacitancia se da en función del factor geométrico  $G$ , de la siguiente manera.

$$C = \frac{1.66 \times 10 SIC}{G} \text{ F/km}$$

La reactancia capacitiva queda definida por la siguiente ecuación:

$$X_c = \frac{1}{2\pi f c}$$

donde  $X_c$  es la reactancia capacitancia en ohm/Km,  $c$  es la capacitancia en farad/Km y  $f$  es la frecuencia del sistema en  $hz$ .

## 2.3 TEORÍA DE TERMINALES Y EMPALMES

### 2.3.1 FUNCIÓN DE LA TERMINAL

La utilización de terminales en los sistemas de distribución tiene como objetivo primario reducir o controlar los esfuerzos eléctricos que se presentan en el aislamiento del cable, al interrumpir y retirar la pantalla semiconductora, y como objetivo secundario el proporcionar al cable una distancia de fuga adicional y hermeticidad.

Para los cables de media tensión, es decir los que rebasan un voltaje nominal de operación de 1,000 Volts, los esfuerzos eléctricos formados ya son considerables, dado que existe una caída de potencial ruda entre el conductor y el plano de tierra, y con el fin de controlar mejor estos esfuerzos se utilizan la terminales (llamadas también conos de alivio)

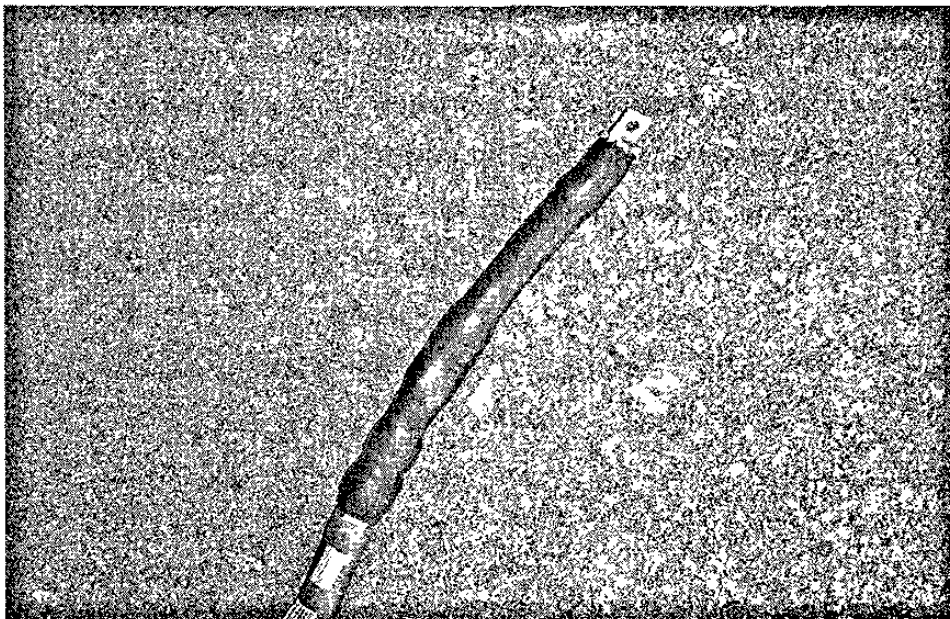


Fig. 2.4 Terminal contráctil en frío.

## 2.3.2 CLASIFICACIÓN DE TERMINALES

En México, la norma que rige a las terminales de media tensión es la NMX-J-199-1997, la cual clasifica a las terminales en la misma forma que la norma IEEE-std-48 de 1996, y ésta se basa en las funciones que puede cumplir el accesorio. La clasificación es la siguiente:

1.- Terminal clase 1: Es aquella que proporciona el control de los esfuerzos que se presentan en el aislamiento del cable al interrumpir y retirar la pantalla; proporciona aislamiento externo completo contra corrientes de fuga entre el(los) conductor(es) y tierra; además proporciona un sello al final del cable contra la entrada del ambiente externo y mantiene la presión de operación de diseño del sistema, si existe. Esta clase está dividida en tres, que son las siguientes:

a) Terminales Clase 1A: Para usarse en cable con aislamiento extruido.

b) Terminales Clase 1B: Para usarse en cable con aislamiento laminado (papel impregnado en aceite), pero que no será sometido a presión.

c) Terminales Clase 1C: Para usarse en cable con aislamiento laminado y que será sometido a presión (Cable tipo *Pipe*).

2.- Terminal clase 2: Son aquellas que proporcionan el control de los esfuerzos eléctricos que se presentan en el aislamiento del cable al interrumpir y retirar la pantalla electrostática; proporciona aislamiento externo completo contra corrientes de fuga entre el(los) conductor(es) y tierra.

3.- Terminal clase 3: Son aquellas que proporcionan únicamente el control de los esfuerzos eléctricos que se presentan en el aislamiento del cable al interrumpir y retirar la pantalla electrostática del cable.

### **2.3.3 FUNCIÓN DEL EMPALME**

Se entiende por empalme a la conexión y reconstrucción de todos los elementos que constituyen un cable de media tensión. Los materiales del empalme deben ser compatibles con los elementos constitutivos del cable que se unirá, y se comportará eléctrica y mecánicamente como los conductores que une.

### **2.3.4 TIPOS DE TERMINALES Y EMPALMES**

Existen varias tecnologías para la elaboración de terminales y empalmes, de las cuales las más comunes son:

- a) Encintadas
- b) Contráctiles en frío
- c) Termocontráctiles
- e) Premoldeados

#### **2.3.4.1 TERMINALES Y EMPALMES ENCINTADOS**

Esta tecnología emplea diferentes tipos de cintas, en el caso de las terminales se forma un especie de cono sobre el aislamiento y pantalla semiconductora para controlar los esfuerzos, y en el caso de los empalmes se restituye los diferentes componentes del cable a excepción de conductor, esto se lleva a cabo aplicando cintas en forma sucesiva, hasta obtener todos los elementos del cable. Esta tecnología es la más económica pero requiere más tiempo de instalación y probabilidades de falla por mano de obra. No obstante las cintas tienen una gran ventaja, ya que con los mismos tipos de materiales se puede hacer frente a cualquier calibre y tensión de cable entre los 5 y los 69 kV,



de modo que aunque sea más lenta para su elaboración, en casos de emergencia facilitan mucho más la posibilidad de conseguir de inmediato los materiales que se requieren para una terminal o empalme.

#### **2.3.4.2 TERMINALES Y EMPALMES CONTRÁCTILES EN FRÍO**

Esta tecnología consiste en tubos de material con memoria elástica pre-ensanchados y colocados sobre un núcleo plástico removible, el cual se retira jalando un cordón.

Esta tecnología es la más rápida, confiable y segura para instalarse, ya que no requiere la utilización de herramientas especiales, tampoco de una preparación complicada ni tampoco de labores que impliquen un cansancio físico, por lo cual las instalaciones tienen una menor probabilidad de fallar.

#### **2.3.4.3 TERMINALES Y EMPALMES TERMOCONTRÁCTILES**

Esta tecnología emplea tubos termocontráctiles para reconstruir las capas del cable de potencia; tiene la desventaja de que al instalarlo se corre el riesgo de degradar el aislamiento primario del cable, ya que este último soporta una temperatura de 90°C y de emergencia hasta de 130°C durante una hora, mientras que los tubos termocontráctiles comienzan su contracción a partir de los 110°C, por lo que la probabilidad de un sobrecalentamiento por concentración de flama o la mínima distracción pueden ser fatales para la vida útil del cable en el que son instalados.

No obstante estos productos también proveen un sello confiable sobre el cable, tanto como los contráctiles en frío, aunque son un poco más resistentes a los cortes que los materiales de hule.

Esta tecnología se encuentra restringida en áreas clasificadas, tal como refinerías e industrias que requieran/produzcan/manejen combustibles, ya que la necesidad de flama los convierte en una fábrica de accidentes poco deseable, o bien, en una grave dificultad para el departamento de mantenimiento para conseguir libranzas de operación y/o permisos para uso de fuego.

#### **2.3.4.4 TERMINALES Y EMPALMES PREMOLDEADOS**

Esta tecnología emplea una pieza de fabricado con hules elastoméricos al tamaño preciso del cable, o sea para una determinada tensión y calibre en específico (puede dañarse el aislamiento al momento de la instalación). Requiere fuerza física para su instalación y su sello no es tan confiable como en los casos anteriores.

## **3 PRUEBA DE HI-POT**

### **3.1 INTRODUCCIÓN**

La utilización de cables de potencia involucra la necesidad de utilizar terminales para poder conectar a otros equipos, como transformadores, interruptores y circuitos aéreos entre otros. Como se describió en el Capítulo 2, existen distintos tipos de terminales y procedimientos para su instalación. Cada tipo de terminal tiene un proceso de instalación determinado, que requiere, entre otros aspectos, retirar la pantalla semiconductora del aislamiento. Este proceso puede dañar o contaminar el aislamiento del cable, y provocar que falle en condiciones normales de operación.

Existe una norma mexicana para terminales (NMX-1997-ANCE), la cual es sumamente parecida a la norma americana (IEEE-std-48-1996), y una para empalmes (Nom j-158-1978, norma americana IEEE-404). Ambas normas se exigen pruebas prototipo y de rutina para analizar la efectividad de las terminal y empalmes.

El propósito de este capítulo es describir el procedimiento de pruebas en campo para la aceptación de una terminal, así como describir la evaluación de los resultados de las pruebas.

En la actualidad el método preferido de para la evaluación de cables es el Hi-Pot. La prueba tiene por objetivo determinar el buen o mal estado de la terminal a través de los valores de la corriente de fuga del aislamiento.

Este simple método permite muchas interpretaciones. Como resultado, no hay conciencia sobre los niveles de voltajes y corrientes para evaluar un cable usado. Para cables nuevos la IEEE ha aceptado valores de voltajes dados por los fabricantes.

Actualmente con una mejor calidad de los cables y la experiencia en la industria, ingenieros de mantenimiento emplean los valores de prueba muy bajos para cables en servicio. Otros usuarios especifican en sus pruebas valores muy altos.

El argumento es que un alto voltaje encontrará el punto más débil del aislamiento antes de instalar un cable. Otro argumento es, que el exceso de alto voltaje producirá un daño innecesario en el aislamiento. Además la prueba repetitiva del cable producirá el deterioro mayor del aislamiento. Un problema implícito es la falta de datos experimentales o información para validar estos argumentos.

## **3.2 PRUEBA DE HI-POT**

El Hi-Pot es un instrumento portátil con salida de alto voltaje de *dc* que da una lectura directa de la corriente (llamada de corriente fuga) en microAmperes.

El objetivo de esta prueba es verificar la confiabilidad del sistema (cable y terminal) en general; no solo que el aislamiento del cable resista la máxima

tensión de operación, sino corroborar que la operatividad de las terminales y empalmes sea la correcta

La prueba de Hi-Pot consiste en aplicar un voltaje de corriente directa a la terminal, durante 6 intervalos de tiempo hasta llegar a el voltaje máximo (ver Tabla 3.1), y cuyo último valor se aplicará durante 5 minutos, siendo la corriente (de fuga) la variable a observar. Esta prueba se aplica únicamente de fase a tierra. La prueba se realiza en instalaciones nuevas, ó en instalaciones con cierto tiempo de operación (como período de garantía) ó a instalaciones viejas con más de 25 años de servicio para determinar su vida útil. Este es un método destructivo y ocasiona deterioro en el aislamiento del cable por el efecto de polarización.

Antes de que un cable de media tensión sea energizado deberá someterse a esta prueba de aceptación. Hay varios equipos disponibles para hacer ésta tipo de pruebas y no existe un estándar en la industria que especifique los procedimientos de prueba, por lo tanto aquí se describe un sistema universalmente aplicable a todo tipo de instalaciones, intentando cubrir la mayoría de las condiciones que intervienen en las pruebas para cables de media tensión y sus accesorios (terminales y empalmes).

### **3.2.1 CONEXIÓN**

El conductor de tierra debe conectarse al equipo de prueba, a las pantallas metálicas del cable, pertiga de tierra del equipo y al sistema de tierra. También deben conectarse a tierra las terminales próximos que no se vayan a probar; por último, el conductor del Hi-pot (alta tensión) se conecta al conductor del cable según muestra en la Fig. 3.1.

En la Fig. 3.1b se muestra el circuito equivalente de la conexión indicada en la Fig. 3.1a donde:  $I_a$  es la corriente de fuga interna a través del aislamiento (del conductor hacia la pantalla metálica). Donde la  $I_x$  es la corriente capacitiva, la  $I_y$  es la corriente de polarización, la  $I_z$  es la corriente de conducción, la  $R$  es la resistencia interna del Hi-pot y  $V$  el voltaje de  $dc$  del Hi-Pot.

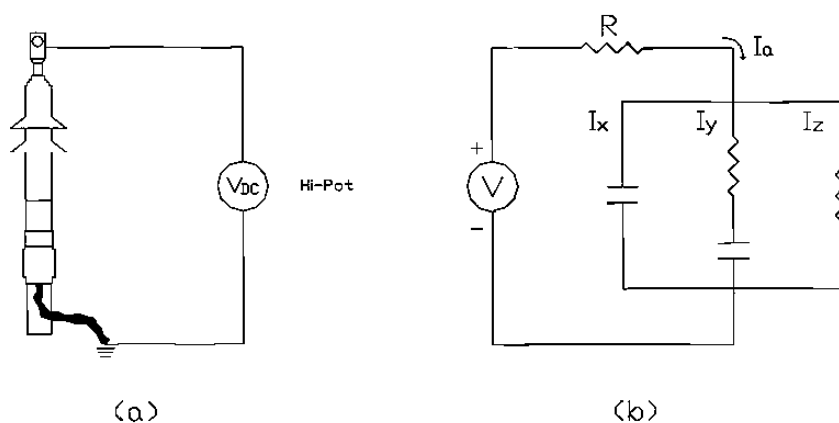


Fig. 3.1 Conexión para la prueba de Hi-Pot, a) conexión física, b) circuito equivalente.

El procedimiento de la prueba de Hi-Pot está definido por la NOM. Esta norma tiene como objetivo establecer las especificaciones y métodos de prueba de equipos y materiales eléctricos. Los tipos de cable de media tensión y sus accesorios, se especifican en la norma NMX-J-1997-ANCE.

Las pruebas de campo deben realizarse de acuerdo a lo indicado en las especificaciones del tipo de cable y tensión de operación del sistema de cableado. En base a esto se debe aplicar una prueba de soporte de tensión en

corriente directa durante 5 minutos sin exceder los valores indicados en la Tabla 3.1.

Tensión de Operación KV	Tensión de aguante en corriente directa durante 5 minutos máximo					
	Durante la instalación (kV)		Después de la instalación (kV)			
	XLP y EP		XLP		EP	
	A	B	A	B	A	B
2.5	12	16	4	5	10	13
5	28	36	9	11	22	29
8.7	36	44	11	14	29	35
15	56	64	18	20	45	51
25	80	96	25	30	67	80
34.5	100	124	31	39	80	99
46	132	172	41	54	106	138
69	192	255	61	81	154	205
115	310	412	101	134	265	352
120	324	431	106	141	277	368
138	372	495	121	161	319	424
161	419	557	140	186	370	492
230	545	752	200	266	531	706
A: Aislamiento al 100%						
B: Aislamiento al 133%						

Tabla 3.1. Pruebas dieléctricas en campo para terminales con cable extruido.

De acuerdo a la Tabla 3.1 el valor de voltaje asignado para la prueba de Hi-Pot depende del voltaje de operación. Por ejemplo un cable típico de campo I de 15 kV, calibre 1/0, 100% de aislamiento le corresponde un voltaje de prueba de 56 kV.

### 3.2.2 CRITERIOS DE EVALUACIÓN DE LOS RESULTADOS

El resultado de la prueba de Hi-Pot es un conjunto de seis pares de valores, compuesto por el voltaje de prueba aplicado y la corriente de fuga medida en el aislamiento y/o superficie de la terminal. En general, el valor de la corriente de fuga caracteriza el estado del aislamiento, y por ende, la calidad de la terminal (o empalme), así como el proceso de instalación.

Sin embargo, el aislamiento tiende a comportarse de forma distinta de acuerdo a las condiciones de la prueba, la calidad del material y el grado de deterioro del mismo. Por ende, no existe un criterio estandar de la magnitud de la corriente de fuga para tomar una decisión. El criterio utilizado en estos casos, es observar el comportamiento de la corriente de fuga en las diferentes etapas de la prueba. El comportamiento esperado despues de cada incremento de voltaje aplicado es que la corriente de fuga presente un pico que posteriormente se estabilice. Los valores de corriente son en general en el orden de microamperes.

Un indicativo de falla es cuando la corriente de fuga presenta dicho pico pero sin estabilizarse, algunas veces de una manera muy rapida, y entonces esto último indica que la falla es severa.

Los factores que pueden influir en la obtención de los valores de la corriente de fuga son: la longitud del cable (a mayor longitud mayor corriente de fuga), la humedad relativa (a mayor humedad relativa mayor corriente de fuga), la temperatura del medio ambiente, los cuidados en la conexión (distancias entre fases, entre la fase y tierra, entre objetos, etc.), el estado físico del cable (humedad, corrosión, nuevo, viejo, etc.), y la densidad del aire.

El análisis de la curva resultante de la prueba nos indica, además del buen estado del sistema (integridad o defecto del cable), otros factores como, la



presencia de humedad, burbujas o contaminación del aislamiento, así como un procedimiento de instalación de inadecuado.

### 3.3 VALOR DE AISLAMIENTO (RESISTENCIA)

Pueden utilizarse la tensión (V) y la corriente de conducción (I) observadas durante la prueba de Hi-Pot para calcular la resistencia efectiva del aislamiento (R) del sistema por medio de la ley de Ohm, donde

$$R = \frac{kV}{I} \quad (\text{K}\Omega)$$

El cálculo de la resistencia contra la tensión de la prueba, en conjunción con la prueba de tensión por pasos, constituye una ayuda para evaluar las condiciones del aislamiento. Una reducción sustancial en la resistencia del aislamiento con el incremento de la tensión es una indicación de daño en el mismo.

Para el aislamiento, su valor de resistencia varía con la longitud. En la medida de que la longitud del aislamiento decrezca, el valor en mega-ohms decrece también. Este cambio no es linealmente proporcional debido a que el aislamiento se comporta como una resistencia en paralelo. Para pruebas de Voltaje, la corriente de Fuga debe incrementarse exponencialmente en la medida que la longitud se incremente.

Antes de efectuar la medición, se determina analíticamente la resistencia del aislamiento del cable, según

$$R = K \log_{10} \left( \frac{D}{d} \right)$$

Donde la  $R$  es la resistencia calculada del aislamiento para  $cd$ ,  $K$  es constante de resistencia del aislamiento,  $D$  es el diámetro sobre el aislamiento en milímetros y  $d$  es el diámetro bajo el aislamiento en milímetros.

Para la medición de la resistencia del aislamiento de un cable de media tensión es común utilizar el megger, antes de realizar la prueba de Hi-Pot.

### **3.4 ANÁLISIS DE RESULTADOS DE LA PRUEBA DE HI-POT**

El criterio de evaluación de la curva voltaje-corriente es lo que permite establecer el estado del aislamiento. Como se mencionó en la sección 3.2.2 para la prueba de Hi-Pot, en los primeros 5 intervalos de tiempo se aplica un voltaje incremental (dependiendo del voltaje nominal y tipo de aislamiento del cable), esto ocasiona un pico de corriente momentáneo, que se estabiliza en un cierto tiempo después de aplicado el voltaje; el valor estable es el que se considera como parte del resultado de la prueba y representa la corriente inicial antes del siguiente incremento de voltaje.

Los intervalos son normalmente menores a 1 minuto, no es necesario esperar el minuto completo ya que si la corriente se estabiliza se puede incrementar el voltaje de la prueba para el siguiente intervalo de tiempo; de igual forma, la estabilización de la corriente en el último intervalo (que es de 5 minutos) a tensión máxima de prueba será motivo para finalizar la prueba. En general, la estabilización de la corriente de fuga es muestra de buen estado del cable y terminal, y del circuito completo. Mientras más rápido se estabilice la corriente y menor sea su valor (este último depende de las condiciones ambientales) es un indicativo de que no hay burbujas de aire y contaminación dentro del aislamiento, así como una buena preparación del cable e instalación de las terminales y los empalmes.

En la Fig. 3.2 a) se muestran las gráficas del comportamiento de la corriente de fuga para el caso de que el cable con aislamiento en buen estado y una terminal bien instalada, esto debido a que en cada uno de los intervalos la corriente se estabilizó y en ningún momento hay un incremento severo de la corriente.

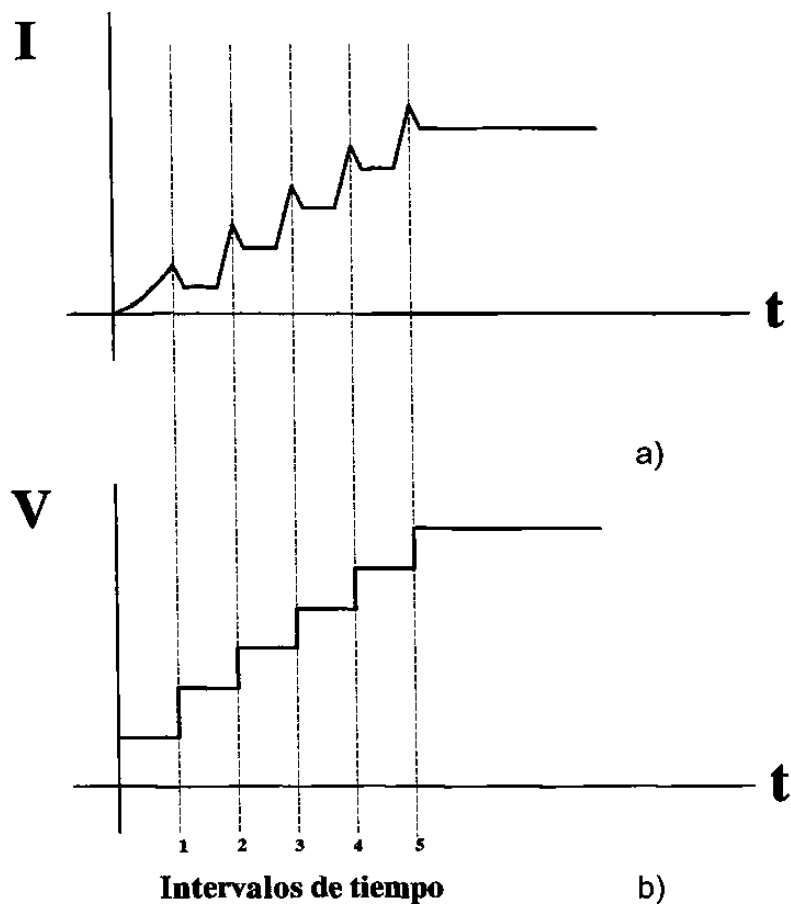


Fig. 3.2 a) Comportamiento de la corriente de fuga b) Valores de voltaje aplicados.

En la Fig. 3.3 se muestran curvas típicas de corriente en el tiempo que se pueden obtener con la prueba de Hi-Pot. Como puede apreciarse, las curvas A, B, y E son las que reflejan un buen estado del aislamiento del cable e

instalación de la terminal. Las curvas C y D reflejan mal estado del aislamiento del cable y/o mala instalación de la terminal.

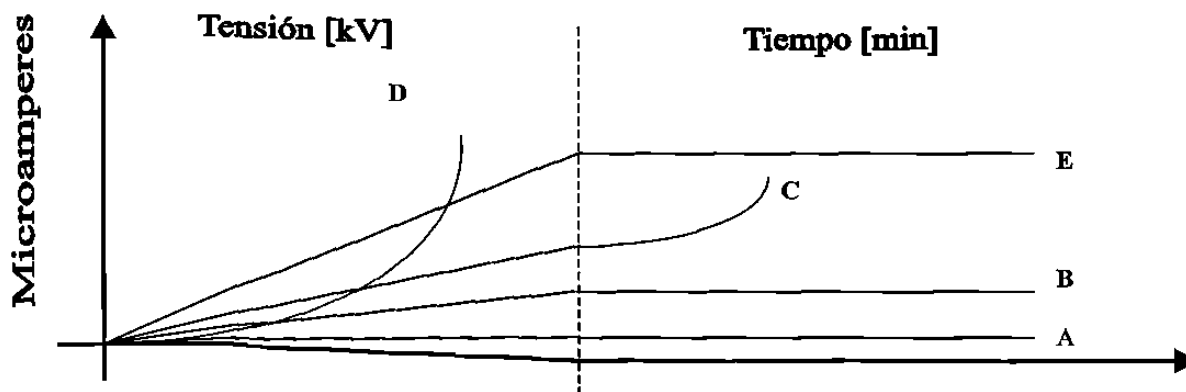


Fig. 3.3 Curvas típicas de corriente en el tiempo de una prueba de Hi-Pot

Segun la experiencia de algunos ingenieros de pruebas, se describen a continuación cada una de las curvas típicas.

- A- Curva típica de un buen aislamiento.
- B- Buen aislamiento con terminales húmedas.
- C- Posibilidad de burbujas o impurezas.
- D- Mano de obra defectuosa, presencia de materiales semiconductores sobre el aislamiento.
- E- Esta curva indica presencia de humedad que no es suficiente para provocar la falla.

En base a lo anterior, se pueden analizar los resultados de una prueba de Hi-Pot. A continuación se incluye un formato típico de un reporte de prueba en campo de un cable de 23 kV, calibre 1/0 AWG de 15 metros de longitud. En la parte final del reporte se indican los valores de la magnitud de la corriente de fuga en cada etapa de la prueba; en este caso se tomo el registro de la corriente cada minuto y la última parte durante cinco minutos a un voltaje sostenido de 80 kV.

Logotipo y/o Nombre de la Compañía que realiza la prueba					
Nombre del Proyecto y/o Usuario Final, sección/localización del circuito,					
No. de Reporte y Fecha					
Nombre del Responsable de las pruebas					
<b>Datos del Circuito</b>			Circuito Provisional de Transformador de Servicios		
<b>Datos del cable</b>			Tipo de Aislamiento: XLP		
Tensión:	23 KV		Nombre del Fabricante		
Longitud:	15 mts		Calibre: 1/0 AWG		
<b>Configuración</b>					
Terminales por fase: 2			Observaciones:		
Empalmes por fase: 0					
<b>Datos de Prueba</b>			Nombre del responsable que aprueba:		
Norma de Referencia:			NMX-J-199-ANCE		
Edad del Circuito: Nuevo, Recién Instalado					
<b>Prueba: Aislamiento @ 5000 V, 1 min.</b>					
F1: 825 Gigaohms					
F2: 3.03 Teraohms					
F3: 1.44 Teraohms					
<b>Prueba Hi-Pot</b>			Nombre del Circuito		
KV	TIEMPO	F-1	F-2	F-3	
4.2	10 seg.	0.10	0.30	0.30	$\mu A$
8.3	20 seg.	0.30	0.30	0.40	$\mu A$
12.5	30 seg.	0.15	0.60	0.40	$\mu A$
16.5	40 seg.	0.34	0.18	0.17	$\mu A$
20.6	50 seg.	0.70	0.35	0.45	$\mu A$
25	60 seg.	0.87	0.73	0.69	$\mu A$
25	1er min.	0.85	0.73	0.68	$\mu A$
25	2do min.	0.85	0.72	0.69	$\mu A$
25	3er min.	0.85	0.71	0.68	$\mu A$
25	4to min.	0.85	0.72	0.68	$\mu A$
25	5to min.	0.85	0.72	0.67	$\mu A$

**Resultados Satisfactorios**

Los valores e información aquí contenidas se basan en fuentes y equipo que consideramos confiables, sin embargo, la Compañía no se hace responsable por el desempeño de los circuitos probados durante su vida útil, más allá de la garantía explícita por escrito aplicable a los 3 productos instalados en dichos circuitos.

**Nombres, firmas y fecha de: Responsable de las pruebas en campo, Responsable de aceptación, testigo o propietario del circuito.**

En la tabla se observa que el comportamiento de la corriente de fuga presente, en las tres fases, es estable, y de valor pequeño (normalmente valores de corriente de fuga en el orden de microamperes se consideran muy aceptable), sin embargo los resultados presentan una variación atípica con respecto a las curvas descritas en las Fig. 3.2 y 3.3. La reducción de la corriente de fuga en el aislamiento durante el incremento del voltaje de prueba no tiene una justificación única, y puede deberse a varios factores, entre los que se pueden mencionar, la exactitud del aparato de medición (calibración del Hi-Pot) las condiciones ambientales en el momento de la prueba, o la falta de homogeneidad del material de que esta compuesto el aislamiento del cable. En general, la forma de la curva es única para cada prueba, incluso para el mismo cable en distintos momentos.

Por tanto, determinar el estado del aislamiento del cable después de la instalación de una terminal o un empalme puede arrojar distintas conclusiones, en dependencia de la experiencia de la persona que realice la prueba y analice los resultados en forma gráfica.

## **4 MÉTODO DE ANALISIS DE LAS PRUEBAS DE HI-POT**

### **4.1 INTRODUCCIÓN**

La industria ha evaluado un número de métodos para determinar tentativamente la aceptabilidad de instalación de un cable nuevo ó usado. A continuación mencionamos diferentes técnicas, con sus ventajas y desventajas.

El Hi-Pot de *ca* ha sido el método más eficiente para determinar una falla en cables. Consiste en aplicar una tensión de alterna a una frecuencia industrial (50-60Hz) al aislamiento. La forma de la onda y la frecuencia de la tensión aplicada representan la manera más fidedigna de determinar los esfuerzos eléctricos que deberá ser capaz de soportar el aislamiento, y no produce cargas espaciales (la aparición de una carga espacial puede provocar la ruptura del aislamiento una vez que el cable entra en servicio). La prueba detecta puntos defectuosos en el cable pero provee poca información acerca de las propiedades del aislamiento. El equipo es grande, de manejo incomodo, costoso y mucho más peligroso que otros métodos. Aunque este método es usado por cada fabricante en su planta, éste no es usado para la evaluación de cables en campo.

El método de Power Factor utiliza una señal de corriente alterna. Esta debe ser 50/60 Hz o alta frecuencia. La corriente es analizada para determinar la presencia de una pérdida anormal. Power Factor es algunas veces llamado  $\cos \delta$  y es el valor de la pérdida (resistencia) del total de la energía (impedancia) de un cable. Esta prueba detecta el deterioro de las propiedades del aislamiento. Este no permite la caracterización y localización del punto defectuoso. Abarca múltiples unidades de frecuencia 1-60 Hz. Requiere una cantidad excesiva de tiempo de prueba y es susceptible a interferencia de fuentes de ruido externas.

El método de Resonancia de pulso es un circuito en serie. Es usado donde los cables proveen la capacitancia en serie con un inductor variable. Esto permite señales largas para ser desarrolladas con un suministro muy pequeño de energía. Por consecuencia el aparato es ligero y no costoso. Una frecuencia de 50/60 Hz es aplicada al cable. Una primera prueba nos da indicaciones sobre las propiedades del aislamiento, mediante la detección de descargas parciales y cambios el factor de potencia. Un suministro pequeño está limitado a cable largos y cable con diferentes características de pérdida dieléctrica.

Dissipation Factor Bridge: Este es el valor de la resistencia (pérdida) de la reactancia capacitiva (energía almacenada) en un cable. Este aparato tiene características similares al factor de potencia. Esta prueba detecta deterioro en el material pero no así la localización del sitio donde se producirá la falla.

El método de Espectroscopio es un aparato que aplica un rango limitado de frecuencia al cable. La respuesta del spectrum es desplegada en un osciloscopio. La forma de la respuesta de la frecuencia es analizada para predecir las propiedades del aislamiento. Muchos análisis detallados y descripciones del cable son requeridos. Esta técnica es apropiada para



investigaciones en laboratorios. Algunos métodos de espectroscopio incluyen baja frecuencia eléctrica, dominio del tiempo, y características de propagación.

El método de Reflectómetro en el dominio del tiempo es un pulso de entrada aplicado a lo largo del cable. La forma, polaridad y el desplazamiento del pulso reflejado pueden ser interpretado para localizar importantes cambio de impedancia de las características de impedancia de un cable. Esta prueba es para localizar fallas, por lo tanto se aplica un potencial en la prueba. La atenuación de la señal se convierte en un problema cuando el aislamiento del cable es muy débil. El perfil del cable es requerido para comparar descargas en la impedancia.

El método de Murry Loop Bridge es un alto voltaje de *cd*. Un balance del puente es utilizado para determinar la localización relativa de la falla. Se requiere una trayectoria de carbón conductivo para que el aparato funcione. Este no funcionará con un corto de directa o multiples imperfecciones del aislamiento.

El método de Descargas Capacitivas donde un alto voltaje de *ca* y una corriente alta son aplicadas para hacer fallar el cable. La energía alta amplía la falla para que este punto pueda ser localizado mediante inspección visual o sonido. El punto de falla si puede ser localizado pero el aislamiento será destruido. Un cambio rápido de voltaje puede causar daño en el aislamiento por un sobre-esfuerzo. Someter el cable a potencia *ca* produce un deterioro del aislamiento. Una larga disipación de energía dará como resultado un sobre-esfuerzo en el aislamiento.

El método de VLF Hipot (Very Low Frequency) es una alternativa muy viable para pruebas de cable de potencia en campo. Este método incorpora al cable un pulso bipolar con una transición sinusoidal a una frecuencia hasta de 0.1 Hz. Se cambia periódicamente la polaridad la cual genera rápidamente una

descarga parcial en la imperfección del aislamiento. Los cambios de polaridad previenen la formación de espacios. El voltaje CA es aproximadamente tres veces más que la fase a tierra. Esta prueba es para localizar el lugar de la falla y vacíos el aislamiento. Este es un nuevo método sin mucha correlación de experiencia en campo, incluso este aparato está patentado actualmente y por ende disponible con un solo fabricante.

Como se mencionó con anterioridad se mostraron diferentes métodos pero ninguno de estos determina en forma precisa si el aislamiento de un cable está en buen estado o si la instalación de la terminal es correcta, excepto el VLF, pero este es un aparato muy costoso y del cual los actuales Ingenieros de campo no tiene experiencia en el uso, y en muchos casos ni el conocimiento de su existencia.

Con datos empíricos y diversas experiencias se ha desarrollado una técnica numérica que puede indicar una futura falla. El propósito de esta técnica es proveer una evaluación consistente para los niveles de corriente de fuga.

El procedimiento es rigurosamente matemático, pero puede ser aplicado en la práctica (en campo). Esta técnica es analizada y se propone un nuevo procedimiento de análisis para determinar el estado del aislamiento. Este método se explicará en el punto 4.5.

## **4.2 PRUEBAS TÍPICAS DE CAMPO**

Varias pruebas de campo son realizadas para determinar el desempeño del cable. Los más comunes son, el volts-ohmmetro, el megger y el Hi-Pot.

La prueba de volts-ohmmetro es muy común, económica y segura, y fácil de realizar. Y aunque sirve para algunas aplicaciones, no funciona para evaluar la calidad del cable. Este instrumento usa 9 Volts para energizar el cable. Esta prueba es realizada sólo como una indicación inicial de la condición del cable mientras esta todavía instalado. Lo más rescatable de esta prueba es es que la lectura indica si el cable o algún componente del sistema eléctrico esta mal conectado.

El megger es un instrumento portátil y moderadamente caro, que provee información limitada acerca de la calidad del cable. El instrumento usualmente suministra 5 kV. Esta prueba puede ayudar a determinar el nivel de desempeño básico del cable, como saber si esta bien aterrizado el cable a través de una terminal.

Y la prueba de Hi-Pot que ya se mencionó con anterioridad, estos aparatos pueden suministrar desde 1 kV hasta 200 kV o más, es utilizado para causar una falla en el punto más débil del aislamiento.

### **4.3 COMPONENTES DE LA CORRIENTE DE FUGA.**

La corriente de fuga esta compuesta de la corriente capacitiva, la corriente de absorción y la corriente de conducción.

La corriente capacitiva es la corriente que carga al capacitor formado entre el dieléctrico que existe entre el conductor y la tierra. Esta componente de corriente empieza extremadamente alta y decrece exponencialmente. Si el voltaje aplicado permanece estable, el valor caerá a cero dentro de pocos segundos despues que la prueba comience.

La corriente de absorción es el resultado de la carga absorbida en el dieléctrico como resultado de la polarización del aislamiento. Esta componente de corriente empieza alta pero decrece un poco más lenta. La corriente se estabiliza comúnmente después de 5 minutos, pero un dato aceptable está disponible después de 2 minutos.

La corriente de conducción es la componente de fuga con valor más estable. Esta es la corriente que viaja sobre, abajo, alrededor y a través del aislamiento. Una descarga parcial o efecto corona proviene de una fuente de alto voltaje y contribuye a la componente de conducción. Un valor bajo estable de corriente de conducción es comúnmente aceptado como indicativo de un buen aislamiento y por consecuencia de una buena preparación de cable e instalación de terminal y/o empalme.

El tiempo requerido para que la corriente de fuga alcance a estabilizarse depende de la temperatura del aislamiento y del material. Si la tensión se mantiene constante y la corriente empieza a incrementarse, es indicativo de que el aislamiento empieza a ceder en algún punto donde tenga un daño. Probablemente este proceso continuará hasta que el cable falle, a menos que se reduzca rápidamente la tensión. Si en cualquier momento durante la prueba, ocurre un incremento violento de la corriente, haciendo operar el interruptor del equipo, seguramente el cable falló por un arqueo en la terminal o por el efecto corona.

Sin embargo una mejor forma de evaluar la corriente de fuga es graficándola vs los diferentes voltajes aplicados. Si la resistencia fuera ideal, esto no se vería afectado por el nivel de voltaje y la relación podría ser lineal. Un incremento en la corriente de fuga indica que el aislamiento tiene un punto de ruptura.

Para un cable viejo, deteriorado o húmedo la corriente incrementa dramáticamente para el mismo voltaje. Los valores de corriente de fuga son

influenciados principalmente por el tipo de material y condiciones de medio ambiente.

## 4.4 CONDUCTANCIA

La industria ha hecho lo posible para determinar un método que pueda ser usado para juzgar la calidad de cualquier aislamiento. Análisis básicos revelan que es inútil tratar de definir desempeños para todos los cables usando un simple número por cada metro. Deben ser considerados la longitud, diámetro del conductor, tipo de aislamiento, construcción geométrica y voltaje. Cualquier valor empleado para determinar la calidad de un aislamiento nuevo o usado deben ser consideradas las propiedades del aislamiento "K".

La resistividad del aislamiento para una particular geometría del conductor requiere considerar el diámetro total " $D$ " y el diámetro interior " $d$ ". La constante típica de resistividad ha sido determinada para aislamientos eléctricos de alta calidad. Estos han sido basados en años de experiencia en altos niveles de voltaje. Por ejemplo, la resistividad de un aislamiento EPDM para niveles de servicio hasta 138,000 volts de ac es  $6.56 \times 10$  para un aislamiento nuevo.

Con la resistencia del EPDM la corriente de conductividad es de 0.05  $\mu\text{A/kV-Kft}$ . Debe aplicarse un factor de corrección para la constante cuando el material (del aislamiento) ha sido expuesto al medio ambiente (intemperie).

Algunas condiciones influyen en la corriente de fuga y aislamiento de la resistencia, tales como temperatura, humedad etc. Para aislamientos nuevos en los cuales la calidad es alta, los valores mas bajos en sistemas usados podrian representar un excelente aislamiento para la aplicación.

## 4.5 ALGORITMO PARA PRONOSTICAR LA FALLA DE AISLAMIENTO (METODO DESCRITO POR DURHAM)

El método Durham que se describe a continuación fue diseñado para pronosticar la falla de un aislamiento a partir de los datos de la prueba de Hi-Pot, evaluando la conductividad del aislamiento como la razón de cambio de un punto.

Cualquier valor empleado para determinar la calidad de un cable nuevo o usado debe basarse en la resistividad del aislamiento, que es la constante característica del tipo de material. El nuevo valor será considerado el punto inicial. El Voltaje y longitud deben ser considerados.

1.- La resistividad es el recíproco de la conductividad, Para obtener la conductancia "G" permisible multiplicamos por la longitud del conductor. Este es el valor para la corriente de fuga por voltaje. Se multiplica para obtener Microamperes por kV.

$$G = 1000 \frac{L}{\rho}$$

$$G = 1000 \frac{L}{K \log(D/d)}$$

2.- Considerando un comportamiento lineal entre el voltaje aplicado durante la prueba y la corriente de fuga, la conductancia se puede representar como una línea recta de pendiente G, es decir,

$$i = GV$$

Este valor de conductancia también se puede determinar de los valores voltaje-corriente que se obtiene de la prueba de Hi-Pot. Según se indica en la Fig 4.1

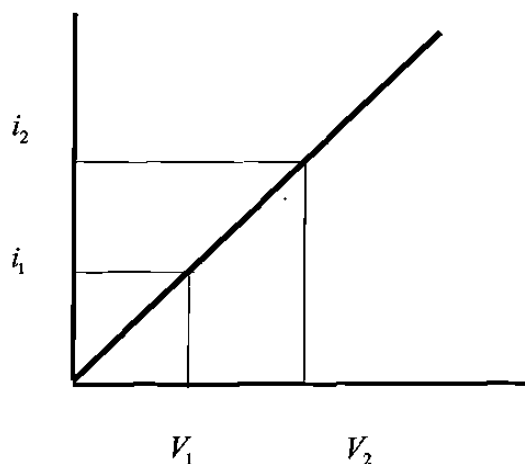


Fig. 4.1 Cálculo de la conductancia a partir de los valores de voltaje y corriente de la prueba Hi-Pot

De acuerdo a la Fig. 4.1

$$G = m = \frac{d(i)}{d(v)} = \frac{(i2 - i1)}{(v2 - v1)}$$

En este caso, la pendiente indica la razón de cambio de la conductancia en distintos instantes de la prueba.

De la Fig. 4.1 si la pendiente  $m$  estimada de esta forma es menor que la conductancia calculada  $G$ , el aislamiento está en perfectas condiciones; en caso contrario, el aislamiento podrá fallar durante su operación.

Esto se resume en la Tabla 4.1.

$m < G$	Buen estado
$m > G$	Fallará

Tabla 4.1 Estado del aislamiento

Como la prueba de Hi-Pot arroja más de dos puntos voltaje corriente, el valor de  $m$  debe re-estimarse para cada nuevo pareja de puntos

3.- El criterio expuesto en la Tabla 4.1 solo indica que el aislamiento fallará, pero no hay información adicional al respecto. Analizando el comportamiento de la corriente después de un incremento de voltaje, este puede ser descrito en la forma siguiente:

$$i = F(1 - e^{av})$$

donde  $F$  y  $a$  son constantes que dependen del aislamiento. Como cada pendiente se calcula con un par de puntos, se tendrá:

$$i_1 = F(1 - e^{av_1})$$

$$i_2 = F(1 - e^{av_2})$$

Dividiendo ambas expresiones y tomando la derivada con respecto al parámetro  $a$ , se tiene

$$\frac{i_1}{i_2} = \frac{1 - e^{av_1}}{1 - e^{av_2}}$$

$$i_1(1 - e^{av_2}) = i_2(1 - e^{av_1})$$



$$-i_1 v_2 e^{av_2} = -i_2 v_1 e^{av_1}$$

$$\frac{V_2}{i_2} e^{av_2} = \frac{V_1}{i_1} e^{av_1}$$

$$\frac{v_2 i_1}{v_1 i_2} = e^{a(v_1 - v_2)}$$

Aplicando logaritmo natural

$$\ln \frac{v_2 i_1}{v_1 i_2} = a(v_1 - v_2)$$

$$a = \frac{\ln \left( \frac{v_2 i_1}{v_1 i_2} \right)}{v_1 - v_2}$$

$$a = \frac{\ln v_2 + \ln i_1 - \ln v_1 - \ln i_2}{v_1 - v_2}$$

Una vez calculado el valor de  $a$ , se puede estimar  $F$  como:

$$F = \frac{i}{1 - e^{av}}$$

Donde  $(i)$  representan el punto actual. Es claro que ambos parametros,  $a$  y  $F$ , deben recalcularse para cada nuevo punto.

4.- De acuerdo al criterio de la tabla 4.1, si el aislamiento puede fallar, debe existir un punto de intersección entre ambas características  $G$  y  $m$ , donde las corrientes tienen que ser iguales. Por tanto, a partir de las siguientes expresiones,

$$i = GV$$

$$i = F(1 - e^{-av})$$

estas se igualan, y deriva en ambos lados de la expresión,

$$GV = F(1 - e^{-av})$$

Aplicando el logaritmo natural y despejando se tiene

$$v = \left(\frac{1}{a}\right) \ln\left(\frac{F}{F - GV}\right)$$

Este es el voltaje estimado al cual puede fallar el aislamiento del cable, según se aprecia en la Fig. 4.2

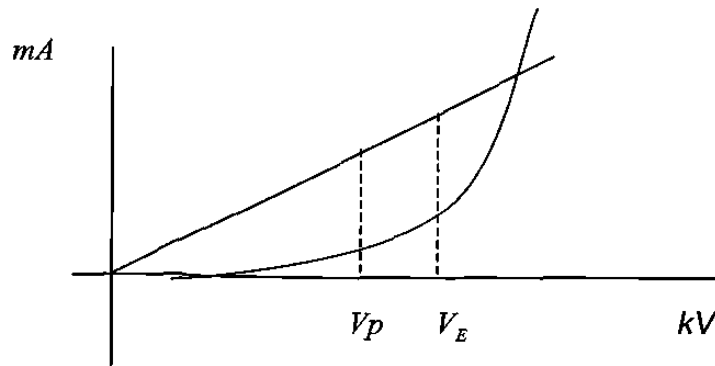


Fig. 4.2 Voltaje de falla estimado del aislamiento.

Donde,  $V_p$  es el voltaje de prueba y  $V_e$  es el voltaje estimado

5.- Una vez calculado el voltaje de falla del aislamiento se propone un factor de calidad del aislamiento, definido como:

$$cq = \frac{V_e}{V_p} (100)$$

Si  $cq = 1$  significa que el aislamiento puede fallar para un voltaje igual al valor máximo de la prueba de Hi-Pot. Esto no significa que falle durante la prueba, pero puede llegar a fallar en el corto tiempo después de entrar en operación.

En forma heurística, se propone  $cq > 40\%$  para considerar que el aislamiento está en buen estado.

Como este factor se calcula en cada etapa de la prueba, cualquier cambio en el voltaje de falla estimado o en el factor  $cq$  será indicativo de un deterioro en el aislamiento.

En la Fig. 4.3 se resume la aplicación del algoritmo, donde la condición  $cq_1 \approx cq_2 \approx cq_3$  representa que el aislamiento está en buen estado; en este caso todos los factores  $cq$  son mayores al 100 %.

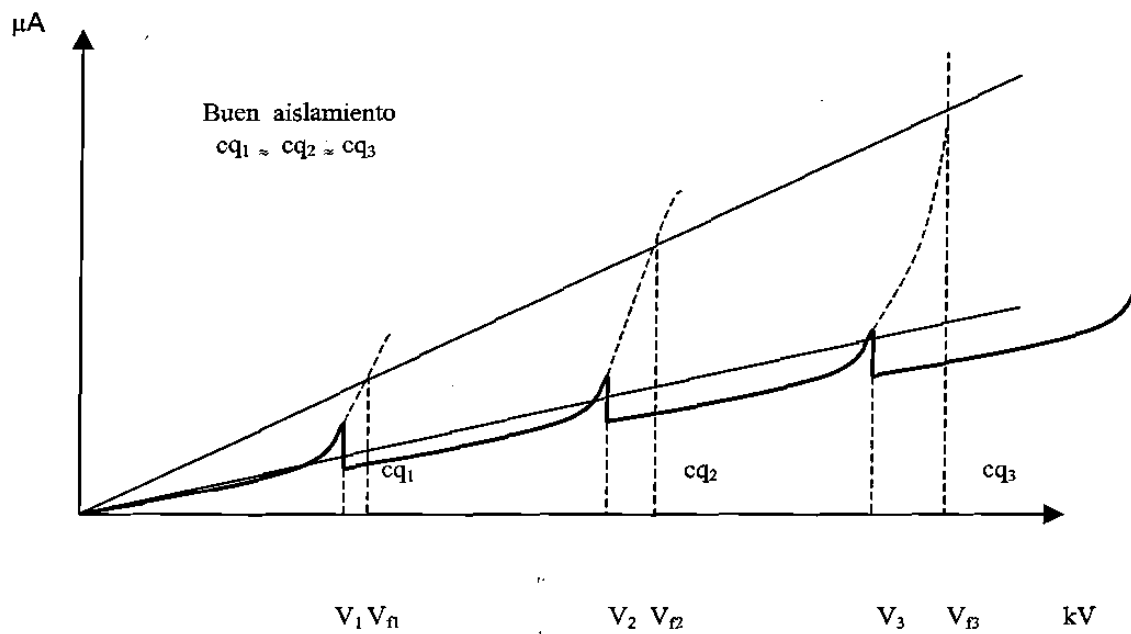


Fig. 4.3. Determinación del estado del aislamiento utilizando el factor  $cq$ , donde  $cqi > 100\%$

### 4.5.1 PROBLEMAS DE IMPLEMENTACION

Para este método de Durham, se identificaron 2 problemas en la implementación que son:

a) La dependencia de la longitud del cable, ya que este influye directamente en el valor de conductancia "G", a mayor longitud mayor conductancia, y cuando la longitud es muy pequeña la conductancia es muy pequeña, que después de ser dividido entre las constantes "F" y "a" en la fórmula  $v = \left(\frac{1}{a}\right) \ln\left(\frac{-G}{aF}\right)$  resulta menor a la unidad y entonces el logaritmo resultante es negativo, y por consecuencia el Voltaje de falla estimado también negativo.

b) El signo de las constantes "F" y "a" son determinantes en el cálculo del voltaje de falla estimado, que en algunas ocasiones el resultado es negativo

$$v = \left(\frac{1}{a}\right) \ln\left(\frac{-G}{aF}\right)$$

Por ejemplo, tenemos un cable de energía de calibre 1000 MCM, con un voltaje de operación nominal de 35 kV, su longitud es 36 metros aproximadamente y aislamiento XLP al 100%. En este caso la norma dice que le corresponde un voltaje de prueba de 80kV. Donde la conductancia tiene un valor de 0.002, y por consecuencia resulta un voltaje estimado de falla negativo de 55 kV. En este caso el signo negativo no es un valor que exista realmente por lo que no se puede considerar para una evaluación. En un plano cartesiano este valor quedaría en el segundo cuadrante, cuando realmente debe estar en el primero.

## 4.6 MÉTODO ALTERNO (SIMFIT)

Considerando las problemas de implementación antes descritos, se considero un segundo método para el ajuste de la función exponencial;  $i = F(1 - e^{av})$ , donde además de realizar una comparación de resultados contra el método anterior, se eliminó la dependencia de los signos de las constantes

“F” y “a” en la ecuación  $v = \left(\frac{1}{a}\right) \ln\left(\frac{-G}{aF}\right)$

SIMFIT es un paquete para simulación, análisis estadístico, ajuste de curvas y representaciones gráficas basadas en modelos suministrados en una biblioteca o definidos por el usuario en un archivo ASCII. Se puede usar para enseñar los principios del ajuste de curvas, simulaciones y análisis estadísticos a estudiantes, pero SIMFIT se adapta mejor a las necesidades de personas interesadas en el análisis de datos y en la creación de gráficas de calidad profesional.

Una de las características de este programa, es que en un formato amigable que ajusta tanto ecuaciones lineales (línea recta, polinomios) como no lineales (exponenciales, Michaelis-Menten, cocientes de polinomios...).

Es este caso en particular el ajuste de la curva exponencial se hará mediante el método de regresión no lineal.

### 4.6.1 AJUSTE A FUNCIONES EXPONENCIALES

El uso de monoexponenciales, biexponenciales...etc, es muy frecuente en la interpretación de muchos fenómenos cinéticos (reacciones de orden 1, reacciones consecutivas, farmacocinética compartimental). El método propuesto contempla la posibilidad de ajustar diferentes tipos de exponenciales, tanto decrecientes como crecientes y siempre con la opción de ajustar una suma de

exponenciales hasta el grado deseado. Estos ajustes se realizan siempre por *regresión no lineal* a la función directa y nunca por *regresión lineal* a sus posibles transformaciones lineales (por ej. la linealización logarítmica de una monoexponencial). La razón es conocida, se basa en que al hacer una transformación lineal cambian los pesos estadísticos a considerar con la variable dependiente, precaución que no suele ser tomada en cuenta y que, además, no es necesaria cuando se ajusta la función directa por regresión no lineal. En la Figura 4.4 se muestra el ajuste consecutivo de 1 y 2 exponenciales a unos datos y, como inserto, a efectos ilustrativos tradicionales, se incluye la representación semilogarítmica. En este caso, la estadística asociada concluye que el ajuste a que el ajuste de exponenciales de 2 exponenciales es mejor que el de 1 exponencial.

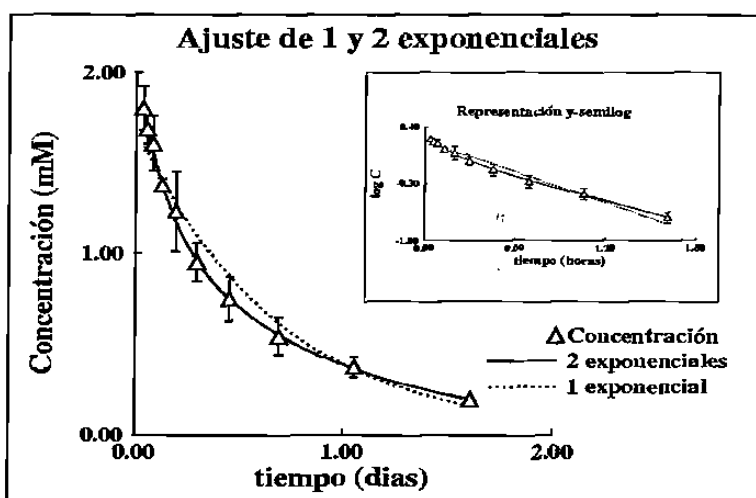


Fig. 4.4 Ajuste consecutivo de 1 y 2 exponenciales

## 4.6.2 IMPLEMENTACIÓN MÉTODO ALTERNO

En este método se considero de igual forma que el método Durham, considerando como base la intersección de la corriente contra la conductancia. Como podremos observar en la Fig. 4.5 mencionaremos 3 claros ejemplos de como podríamos validar la calidad de la terminal y aislamiento de un cable.

- 1) Si la corriente interseca antes del valor de voltaje de prueba, entonces la falla de la terminal y/o cable sera inminente. Como lo muestra la corriente  $i_1$ .
- 2) Si la intersección es por encima del voltaje de operación, entonces la terminales esta en buenas condiciones, más sin embargo Durham considera al menos un 40% sobre el voltaje de prueba. Como lo muestra la corriente  $i_2$ .
- 3) Si la tendencia es que la corriente no intersece con la conductancia, entonces en definitiva la terminal y/o aislamiento del cable estan en óptimas condiciones para operar y tener una duración de al menos 25 ó 30 años aproximadamente. Como lo muestra la corriente  $i_3$ .



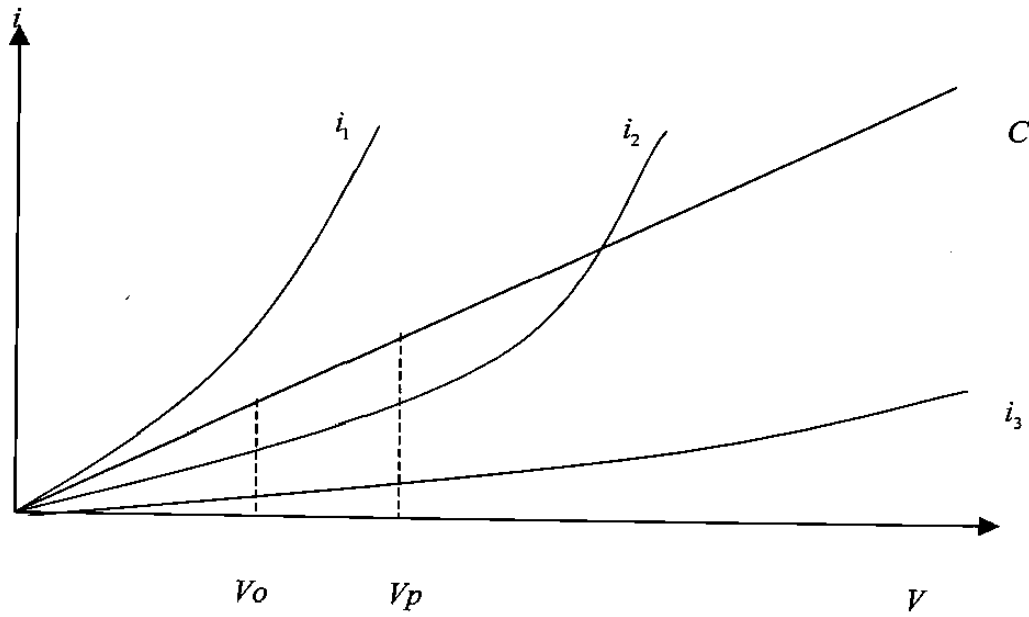


Fig 4.5 Grafica corriente-conductancia, que determina la calidad de la terminal y/o aislamiento del cable

Donde,  $V_o$  es el voltaje de operación,  $V_p$  es el voltaje de prueba.

## 5 VALIDACIÓN DE RESULTADOS

### 5.1 INTRODUCCIÓN

Como parte complementaria, se presentan una serie de pruebas reales de Hi-Pot efectuadas en campo para la validación de dichos métodos. Parte de las pruebas fueron tomadas de manera directa de los reportes existentes de la industria y otras fueron efectuadas para la evaluación del método Durham.

El programa se probó con al menos 4 diferentes pruebas de campo, a continuación veremos los resultados de cada caso en particular, de una forma simplificada.

Para ambos métodos (Durham y Alterno), se evaluó la corriente  $i = F(1 - e^{-av})$  contra la conductancia, considerando los diferentes valores de constante arrojados por cada uno de los métodos. Para el método Durham se considero la ultima pareja de valores ( $I$  y  $V$ ).

## 5.2 Caso No. 1 Planta generadora de energía

Este es un cable de energía de calibre 3/0 AWG, con un voltaje de operación nominal de 15 kV aislamiento al 100%. El material del aislamiento es XLP y su longitud es 18 metros aproximadamente. La NOM recomienda que el voltaje de prueba para un cable de 15kV de operación, sea de 55 kV, más sin embargo, este contratista toma otras consideraciones para definir el voltaje de prueba, ya que es una planta para CFE. Los valores de corriente de fuga se muestran en la tabla 5.1

KV	microA
0	0
6	0.2
12	2.7
18	14
24	27
30	40
36	60
36	60
36	60
36	60
36	60

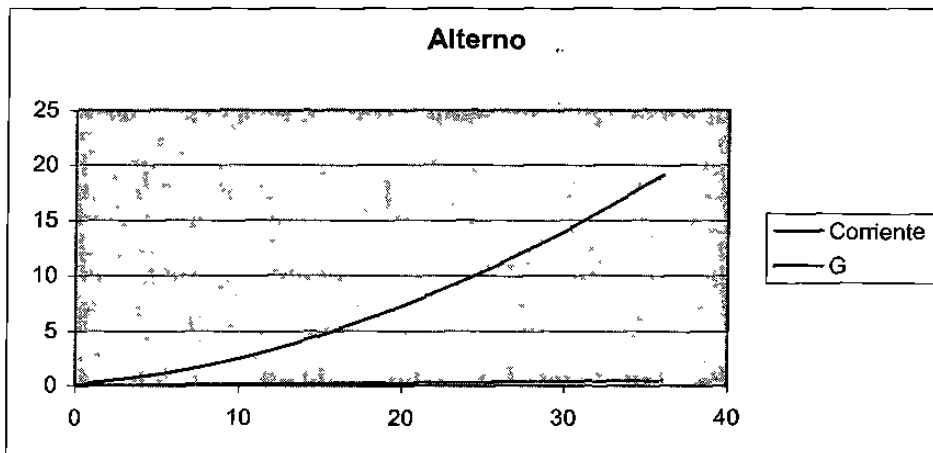
Tabla 5.1 Valores de corriente, caso 1

Para los ingenieros del departamento que calidad que supervisa las pruebas, el resultado fue dudoso ya que la corriente de fuga aunque se estabilizó, el valor fue alto considerando que ya tenían referencias en esa misma planta, con cables de la mismo tipo (en cuanto a voltaje y longitud)

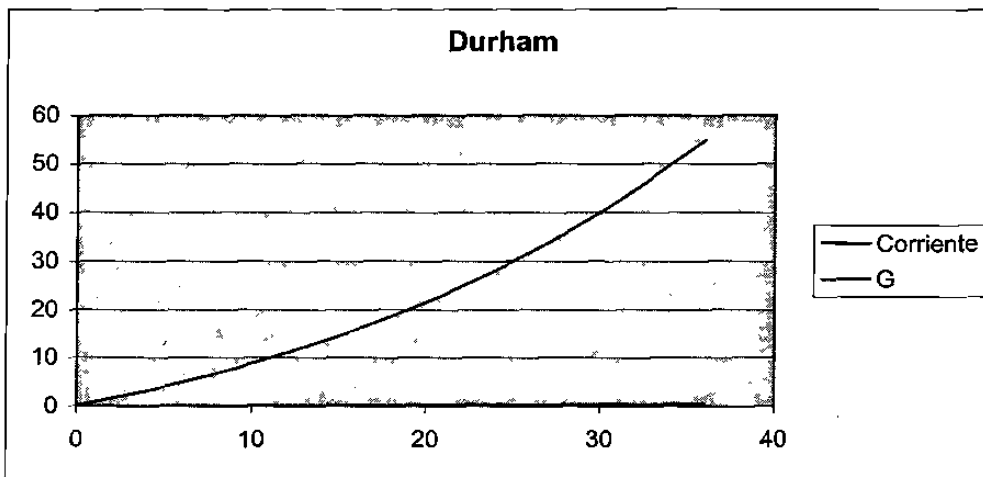
Y aunque se pensó en cortar la terminal para volver a instalar otra, se tomo el riesgo de dejarla instalada, considerando que la corriente de fuga se estabilizó y se mantuvo constante durante los últimos 5 minutos a 60 microamperes. Los resultados se muestran en la tabla 5.2

Alterno			Durham		
KV	Corriente	G	kV	Corriente	G
0	0	0	0	0	0
6	1.28	0.08	6	4.87	0.08
12	3.32	0.16	12	10.97	0.16
18	6.12	0.24	18	18.58	0.24
24	9.69	0.32	24	28.10	0.32
30	14.02	0.40	30	40.00	0.40
36	19.11	0.48	36	54.87	0.48

Tabla 5.2 Resultados y evaluación por los métodos Durham y Alterno



Gráfica 5.1 corriente vs conductancia método Alterno



Grafica 5.2 corriente vs conductancia método Durham

En conclusión, como se puede observar en ambas gráficas tanto en el modelo Durham como en el propuesto, la trayectoria de la corriente de fuga esta siempre por encima de la trayectoria de la conductancia, y su cruce fue desde casi cero, por lo que el cable seguramente fallará en un corto o mediano plazo.

### 5.3 Caso No 2 Planta de refinación (petróleo)

Tenemos 2 cables de energía de calibre 500 MCM, con un voltaje de operación nominal de 5 kV, aislamiento al 133%, el material del aislamiento es XLP y su longitud es 1000 metros aproximadamente. La NOM recomienda que el voltaje de prueba para un cable de 5kV de operación con el 133% de aislamiento, es de 36 kV, sin embargo de igual forma que el caso anterior se tomaron otras consideraciones para definir el voltaje de prueba, incluso el tiempo de prueba no fue de 5 minutos, sino de 15 minutos.

	Fase 1	Fase 2
KV	microA	MicroA
0	0	0
2.5	0	0
5	0.1	0
7.5	0.3	0.2
10	0.7	0.4
12.5	1.3	0.8
15	2.3	1
17.5	3	1.2
20	4	1.5
22.5	4.7	2
25	4	3

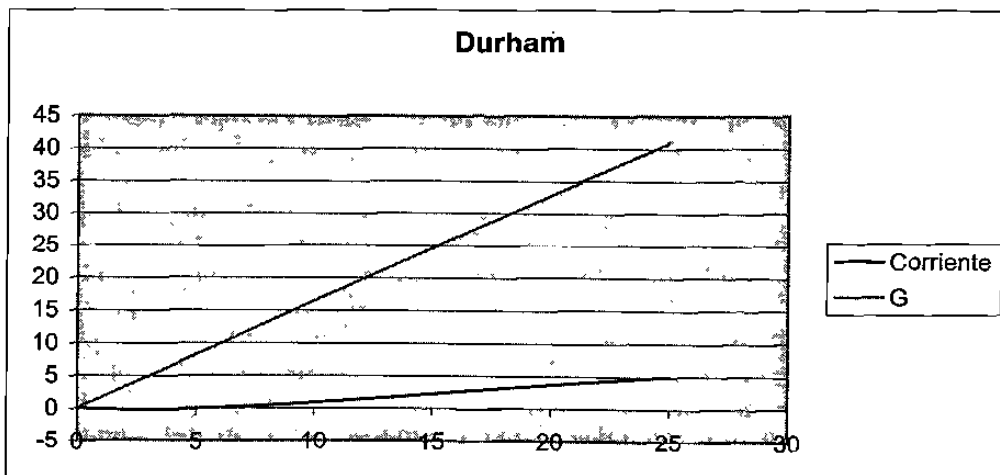
Tabla 5.3 Valores de corriente, caso 2

El resultado de estas pruebas, según los ingenieros del área de mantenimiento de esta industria pública son satisfactorios; considerando que tiene una gran experiencia en este tipo de pruebas debido a que ellos mismo las realizan y no las subcontratan. Y que además este tipo de instalaciones son comunes y la mayoría con el mismo calibre y voltaje de operación, por lo que tiene un gran historial de pruebas y pueden tener un comparativo entre ellas.

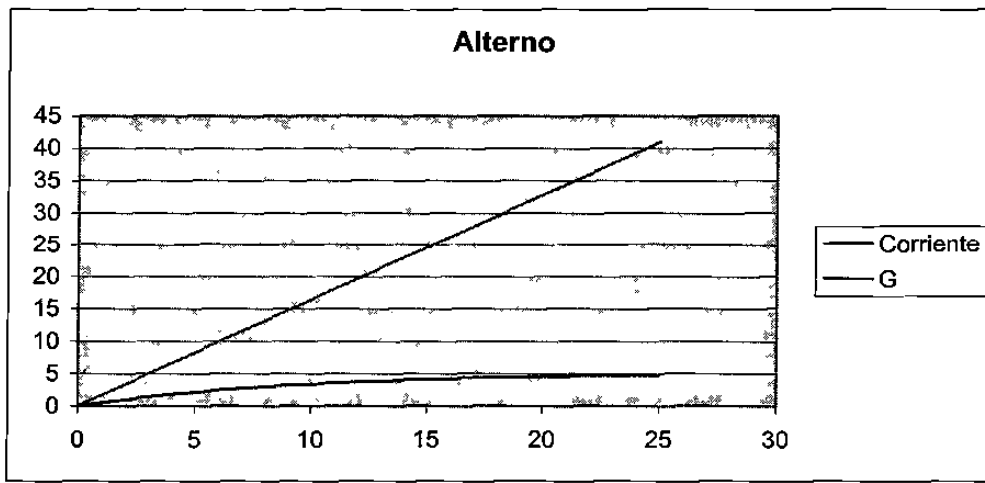
A continuación se muestran en la Tabla 5.4 los resultados y evaluación de los métodos Durham y Alterno, para Fase 1.

Alterno			Durham		
KV	Corriente	G	Kv	Corriente	G
0	0	0	0	0	0
2.5	-0.20	4.10	2.5	1.21	4.10
5	-0.06	8.20	5	2.14	8.20
7.5	0.33	12.31	7.5	2.85	12.31
10	0.87	16.41	10	3.39	16.41
12.5	1.53	20.51	12.5	3.81	20.51
15	2.24	24.61	15	4.13	24.61
17.5	2.97	28.71	17.5	4.37	28.71
20	3.70	32.82	20	4.56	32.82
22.5	4.42	36.92	22.5	4.70	36.92
25	5.11	41.02	25	4.81	41.02

Tabla 5.4 Resultados y evaluación por los métodos Durham y Alterno, para Fase 1



Grafica 5.3 corriente vs conductancia método Durham



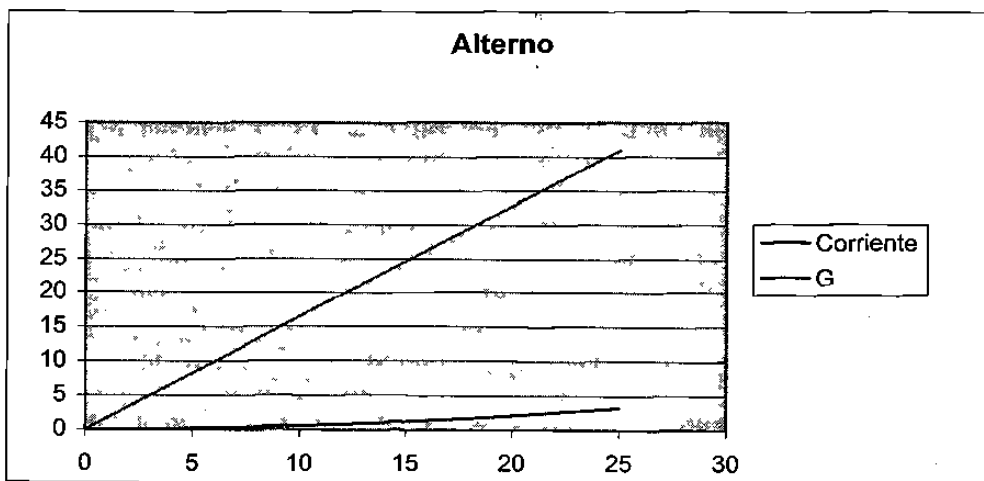
Grafica 5.4 corriente vs conductancia método Alterno

En conclusión, como se puede observar en ambas gráficas tanto en el modelo Durham como en el propuesto, la trayectoria de la corriente de fuga esta siempre por debajo de la trayectoria de la conductancia, y en este caso no hay intersección entre ambas líneas, por lo tanto este nos garantiza que un buen desempeño eléctrico tanto en el cable como en la terminal.

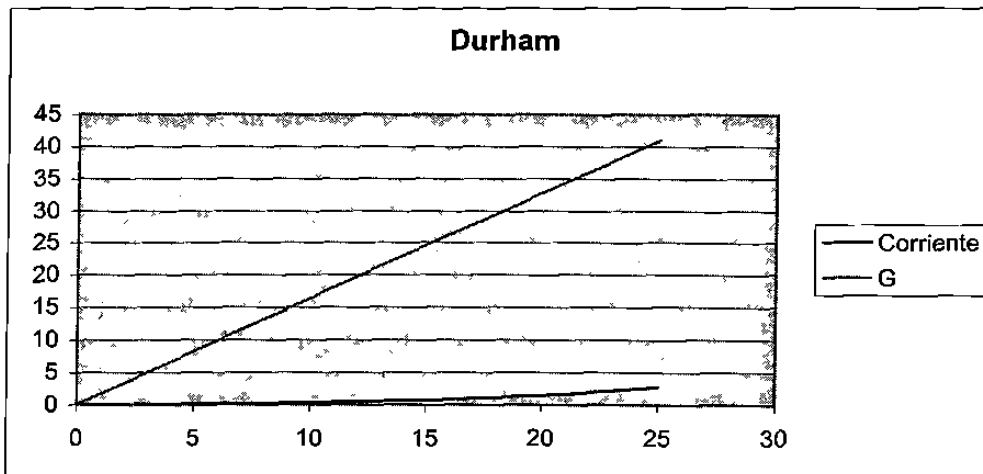


Alterno			Durham		
KV	Corriente	G	kV	Corriente	G
0	0	0	0	0	0
2.5	0.05	4.10	2.5	0.05	4.10
5	0.17	8.20	5	0.12	8.20
7.5	0.34	12.31	7.5	0.21	12.31
10	0.57	16.41	10	0.33	16.41
12.5	0.87	20.51	12.5	0.50	20.51
15	1.23	24.61	15	0.73	24.61
17.5	1.64	28.71	17.5	1.03	28.71
20	2.12	32.82	20	1.44	32.82
22.5	2.65	36.92	22.5	2.00	36.92
25	3.24	41.02	25	2.75	41.02

Tabla 5.5 Resultados y evaluación por los métodos Durham y Alterno, para Fase 2



Grafica 5.5 corriente vs conductancia método Alterno



Gráfica 5.6 corriente vs conductancia método Durham

En conclusión, de forma similar a la fase 1 de este mismo caso, se puede observar en ambas gráficas tanto en el modelo Durham como en el Propuesto, que la trayectoria de la corriente de fuga esta siempre por debajo de la trayectoria de la conductancia, y en este caso no hay intersección entre ambas líneas, por lo tanto este nos garantiza que un buen desempeño eléctrico tanto en el cable como en la terminal.

### 5.4 Caso No 3, Terminal con cable dañado

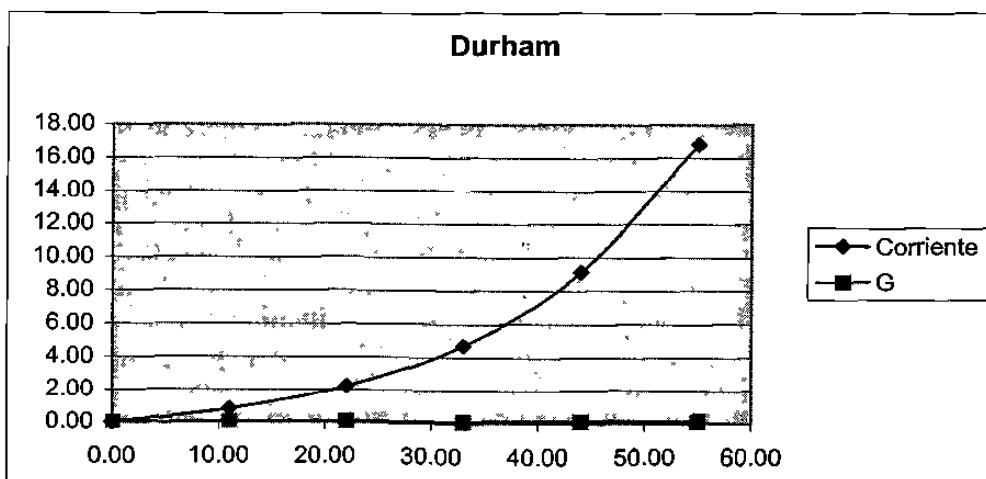
En este caso, se realizó una instalación con un cable mal preparado intencionalmente, con la finalidad de ver el desarrollo de ambos métodos

Este cable de energía de calibre 1/0 AWG, con un voltaje de operación nominal de 15 kV, aislamiento al 100%, el material del aislamiento es XLP y su longitud es de 4 metros aproximadamente. La NOM recomienda que el voltaje

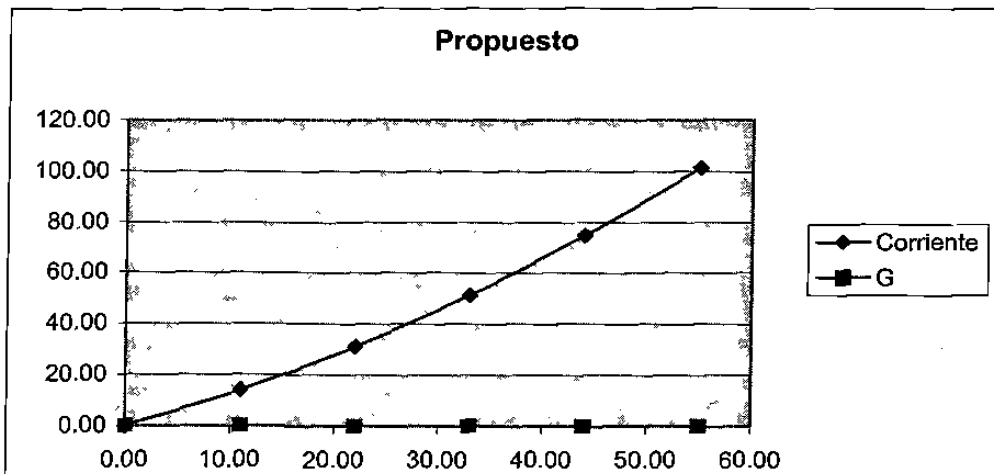
de prueba para un cable de 15kV de operación con el 100% de aislamiento, sea de 55 kV.

	Alternio			Durham	
kV	Corriente	G	kV	Corriente	G
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
11.00	13.97	0.04	11.00	0.81	0.04
22.00	31.10	0.07	22.00	2.22	0.07
33.00	51.38	0.11	33.00	4.72	0.11
44.00	74.80	0.14	44.00	9.10	0.14
55.00	101.37	0.18	55.00	16.81	0.18

Tabla 5.6 Resultados y evaluación por los métodos Durham y Alternio



Grafica 5.7 corriente vs conductancia método Durham



Grafica 5.8 corriente vs conductancia método Propuesto

En conclusion, se puede observar en ambas gráficas tanto en el modelo Durham como en el Alterno, la trayectoria de la corriente de fuga esta siempre por encima de la trayectoria de la conductancia, y en este caso la intersección entre ambas líneas es en un valor casi cero, por lo tanto no cabe la menor duda que la terminal fallará en un "corto plazo. Cabe mencionar que este es un ejemplo muy claro de lo que pasa actualmmente con las interpretaciones de pruebas de Hi-Pot, ya que como lo mencionamos en el capítulo 3, todo ingeniero en campo se basa en observar que la corriente de fuga se estabilize, y en este caso en particular el cable fue dañado severamente, y con todo y eso la corriente se estabilizó en 24 miliamperes, con un voltaje de 55 V.

## 5.5 CONCLUSIONES DE LA VALIDACIÓN DE RESULTADOS

El método Durham se probó con distintos casos prácticos, de los cuales se tiene disponible los datos de la prueba de Hi-Pot. Los casos incluyeron cables en buen estado, y cables que tenían problemas. Los casos incluyen una prueba física, donde intencionalmente se dañó el aislamiento durante el montaje. En todos los casos, los resultados obtenidos son similares a los obtenidos por Durham.

Como ya lo mencionamos en el capítulo 4, se utilizó un software (SIMFIT), que nos ayudo en confirmar las tendencias de la corriente, que al comparar el resultado contra el método Durham confirma que las ecuaciones propuestas para definir las constantes " $F$ " y " $a$ " son un base solida teórica, debido a que con los diferentes métodos las corrientes son muy parecidas.

## **6 CONCLUSIONES**

### **6.1 INTRODUCCION**

Las principales conclusiones del presente trabajo de tesis son las siguientes:

La tendencia en las redes de distribución, incluyendo los sistemas eléctricos industriales son hacia la utilización de sistemas subterráneos. Esto incrementará el número de interconexiones con los sistemas de distribución aéreos a través de terminales y empalmes.

La apropiada instalación de las terminales y empalmes permite aumentar la confiabilidad de las instalaciones, considerando los límites de operación por sobrevoltajes originados por distintas razones, como descargas atmosféricas, maniobras de cierre y apertura de interruptores y cuchillas, y ferresonancia entre otras.

El problema principal asociado a la instalación de terminales y empalmes es la presencia de corrientes de fuga a través del aislamiento del cable. Altos valores de corrientes de fuga, significan que el aislamiento del cable esta

degradado, lo cual puede ocurrir por diversas razones, como son el daño físico durante la instalación de la terminal (o empalme), humedad, o aire atrapado. Esto prueba provocar la falla de la terminal en forma prematura; en este sentido, se considera que el tiempo de vida útil del cable debe ser de 25 ó 30 años aprximadamente.

Una alternativa para evaluar la integridad del aislamiento después del montaje de una terminal es a través de una prueba de Hi-Pot, que consiste en aplicar un alto voltaje de *cd* entre la terminal y el aislamiento y medir la corriente de fuga resultante. La prueba se hace en etapas hasta un valor máximo de voltaje que depende del voltaje de operación nominal del cable, obteniéndose una gráfica del comportamiento de la corriente de fuga.

Tradicionalmente, el criterio utilizado para determinar el estado del aislamiento después del montaje se basa en la estabilización de la corriente de fuga hacia la parte final de la prueba de Hi-Pot, de tal forma que con independencia del valor final de la corriente de fuga, si esta se estabiliza en un valor final, se considera que la instalación fue correcta, y se acepta para su operación. En caso contrario, si la corriente presenta una tendencia a aumentar para valores de voltaje mayores, se considera que hubo problemas en la instalación, y el montaje no se acepta.

La práctica ha demostrado que este criterio no es válido, ya que si el valor al cual se estabiliza la corriente es muy alto, significa que la terminal puede falla en el corto o mediano plazo. Esto hace necesario la definición de un método más formal que permita determinar en forma más apropiada el estado del aislamiento.

El método de Durham utiliza la información de voltaje y corriente obtenida en la prueba de Hi-Pot para estimar un voltaje de ruptura, que representa el voltaje al cual puede fallar el cable; este voltaje es estimado como la

intersección de una función exponencial, que modela el comportamiento de la corriente de fuga, y la conductancia del cable, que se determina a través de los parámetros físicos del cable y la terminal. En este caso, Durham considera que la instalación de la terminal es correcta cuando la relación del voltaje de ruptura estimado y el voltaje máximo de la prueba es mayor al 40%.

El método propuesto por Durham es apropiado, pero tiene problemas cuando se ajustan los términos de la función exponencial que representa la corriente de fuga, ya que se obtienen voltaje de ruptura negativos. Este es un problema numérico, que se presenta en cables de longitud muy corta y cuando el comportamiento de la corriente de fuga no es lo suficientemente similar a una función exponencial.

A fin de establecer un método más robusto, se propone un nuevo método que aproxima el comportamiento de la corriente de fuga con una función doble exponencial; a diferencia del método de Durham, donde los coeficientes de la función se estiman a partir de una ecuación algebraica, el método propuesto utiliza técnicas de regresión no-lineal, como apoyo del programa de simulación SIMFIT.

El procedimiento consiste en aproximar el contorno de la corriente de fuga reportada por la prueba de Hi-Pot a través de una función doble exponencial, a partir de los valores de voltaje y corriente obtenidos en la prueba. En este caso se estima un voltaje de ruptura, que es la intersección de la función doble exponencial y la línea de conductancia del cable; este proceso es similar al del método de Durham.

Los criterios establecidos a partir del voltaje estimado son simples, ya que mientras mayor sea el voltaje estimado, significa que el cable y la terminal soportarán condiciones extremas sin dañarse. El método no permite definir en



forma precisa el estado del aislamiento, sin embargo, indirectamente se puede prever su límite operativo por sobrevoltajes.

## **6.2 APORTACIONES**

Las principales aportaciones derivadas de este trabajo de tesis son las siguientes:

Se realizó una revisión profunda de la aplicación de la prueba de Hi-Pot para estimar el estado del aislamiento de un cable después del montaje de una terminal o empalme. Se determinaron los criterios utilizados, así como los problemas que presentan en la aplicación práctica.

Se propone un método alternativo, más simple y robusto para determinar el voltaje de ruptura del cable, como una medida indirecta del estado del aislamiento después del montaje.

## **6.3 RECOMENDACIONES PARA TRABAJOS FUTUROS**

El desarrollo de este trabajo de investigación se enfocó al desarrollo de un método que permita establecer en forma sencilla y confiable el estado del aislamiento de un cable de potencia después del montaje de una terminal o empalme; a continuación se enumeran las principales recomendaciones para trabajos futuros en esta área de conocimiento:

Realizar un mayor número de pruebas para caracterizar el comportamiento de la corriente de fuga para problemas particulares, como son la presencia de humedad, aire, o una mala instalación.

Automatizar el método, e incorporarlo como parte de los equipos de prueba de Hi-Pot.

Considerar las características físicas del aislamiento como parte del proceso de estimación del voltaje de ruptura; de esta forma se tendrían en cuenta los defectos de fabricación del cable, o las impurezas presentes debido al proceso de fabricación.

## BIBLIOGRAFIA

- Victor Sierra Madrigal, Manual técnico de cables de Energía, McGraw-Hill de México SA de CV, 1984
- Norma IEEE-std-404-1993 High Voltage Splice Devices for Power Cables.
- Norma NMX-J-199-1997-ANCE, Norma Mexicana para Terminales de Media Tensión
- Distribución Subterránea (CFE y, Luz y Fuerza del Centro)
- Instruction Manual AVTM22-726Jc, Biddle Instruments Blue Bell, 1990
- Robert. A. Durham, Artículo IEEE. 2001
- IEEE Guide for marking High-Direct-Voltage Test on power cable systems in field, 1991
- IEEE Standard Techniques for High-Voltage Testing
- IEEE Recommended practice for installation, termination and testing, 1989
- Boletín Información técnica y comercial (fabricante de terminales y empalmes) 3M México. 2001
- Boletín Información técnica y comercial (fabricante de terminales y empalmes) Raychem. 2001

## LISTADO DE FIGURAS

	Pagina
2.1a Estructura básica de un cable	9
2.1b Estructura básica de un cable con pantalla metálica de cintas	10
2.1c Estructura básica de un cable con pantalla metálica de cintas	10
2.2 Estructura de tres tipos de cables	11
2.3 Formación de una superficie equipotencial uniforme mediante uso de una pantalla semiconductor.	18
2.4 Tipos de terminales	22
3.1 Conexión para la prueba de Hi-Pot, a) conexión física, b) circuito equivalente	30
3.2a Comportamiento de la corriente durante la prueba de Hi-Pot	35
3.2b Valores de voltaje aplicados en la prueba de Hi-Pot	35
3.3 Curvas típicas de corriente en el tiempo de una prueba de Hi-Pot	36
4.1 Calculo de la conductancia a partir de los valores de voltaje y corriente de la prueba Hi-Pot.	47
4.2 Voltaje de falla estimado del aislamiento.	51
4.3 Determinación del estado del aislamiento utilizando el factor $cq$	52
4.4 Ajuste consecutivo de 1 y 2 exponenciales	55
4.5 Grafica corriente-conductancia, que determina la calidad de la terminal y/o aislamiento del cable	57

## LISTADO DE TABLAS

	Pagina
2.1 Propiedades de los materiales empleados como conductores	12
2.2 Calibres de los conductores	14
3.1 Pruebas dieléctricas en campo para terminales con cable extruido.	31
4.1 Estado del aislamiento	48
5.1 Valores de corriente, caso 1	59
5.2 Resultados y evaluación por los métodos Durham y Propuesto.	60
5.3 Valores de corriente, caso 2	62
5.4 Resultados y evaluación por los métodos Durham y Alterno, para Fase 1	63
5.5 Resultados y evaluación por los métodos Durham y Propuesto, para Fase 2	65
5.6 Resultados y evaluación por los métodos Durham y Propuesto	67

## LISTADO DE GRÁFICAS

	Pagina
5.1 corriente vs conductancia método Alterno, caso 1	60
5.2 corriente vs conductancia método Durham, caso 1	61
5.3 corriente vs conductancia método Durham, caso 2, fase 1	63
5.4 corriente vs conductancia método Alterno, caso 2, fase 1	64
5.5 corriente vs conductancia método Alterno, caso 2, fase 2	65
5.6 corriente vs conductancia método Durham, caso 2, fase 2	66
5.7 corriente vs conductancia método Alterno, caso 3	67
5.8 corriente vs conductancia método Durham, caso 3	68

## **AUTOBIOGRAFÍA**

Mi nombre es Jesús Roberto Martínez Rodríguez, nací en Monterrey un 18 de Marzo de 1973, soy casado y tengo dos hermosas niñas.

Estudí la carrera de Ing. En Control e Instrumentación en la Universidad Mexicana del Noreste y me gradué en el año 1994

Mi experiencia Laboral es la siguiente, mi primera trabajo fue en el año de 1995 en Control Adaptable SA de CV., donde laboré como Ingeniero de Ventas Técnicas (equipo de control), en 1996 me dieron la oportunidad en la compañía ABB Sistemas SA de CV. Me desempeñé en el mismo puesto pero mi desarrollo en el área de ventas fue relevante. Y en 1997 empecé en 3M México SA de CV., donde actualmente trabajo como Ingeniero de Ventas Técnicas Especializadas. Tengo la responsabilidad de la división de productos eléctricos (sistemas de aislamiento y continuidad eléctrica) de la parte técnica y comercial. Las principales funciones que desempeño son la especificación e instalación de los productos, así como la asesoría a usuarios en campo.

