

21



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS PROFESIONALES CAMPUS ARAGON

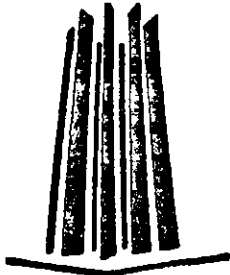
ANALISIS DE PRUEBAS ELECTRICAS A CABLES SUBTERRANEOS CON AISLAMIENTO XLP Y EP EN MEDIA TENSION

294050

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE: INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA (AREA ELECTRICA-ELECTRONICA) PRESENTA: JOSE CARLOS RICARDO CONDE FARIAS

DIRECTOR DE TESIS: ING. ABEL VERDE CRUZ



MEXICO

2001



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

# TESIS CON FALLA DE ORIGEN

## A DIOS

Por haber escogido a los padres que tengo.  
Por darme la fortaleza suficiente de terminar mis estudios

## A MIS PADRES

SR. JOSÉ TOMÁS CONDE PAREDES  
SRA. YOLANDA FARÍAS RAMÍREZ.

Por haberme dado el apoyo y ejemplo que en cada momento de la vida me han dado.

Por haber sido los impulsores para alcanzar una carrera profesional.

## A MIS HERMANOS

FRANCISCO JAVIER Y KARLA YOLANDA.  
Por haber esperado su turno ante la computadora.

## A MI QUERIDA UNIVERSIDAD

Por haberme permitido estar en sus aulas e instalaciones y haber formado un profesionista útil a la sociedad.

A MI ASESOR DE TESIS ING. ABEL VERDE CRUZ  
Por su colaboración y su tiempo.

## A LA COMPAÑÍA DE LUZ Y FUERZA

En especial a mi amigo Ing. RAÚL RIVES GARCÍA.  
Por haberme brindado las facilidades necesarias para poder desarrollar este trabajo.

A MIS AMIGOS Y COMPAÑEROS DE GENERACIÓN.

## INDICE GENERAL

TEMA	PÁGINA
<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>1</b>
<b>CAPÍTULO I</b>	
<b>“CABLES DE ENERGÍA CON AISLAMIENTO XLP Y EP”.</b>	
I.1. ANTECEDENTES HISTÓRICOS DE LOS CABLES DE ENERGÍA. ....	4
I.2. ANTECEDENTES DEL POLIETILENO.....	7
I.3. VENTAJAS DEL AISLAMIENTO SECO.....	7
I.4. COMPOSICIÓN.....	8
I.5. FABRICACIÓN Y REVISIÓN.....	9
I.6. COMPARACIÓN DE AISLAMIENTOS.....	9
I.6.1. COMPARACIÓN DEL EP vs. XLP.....	12
I.7. COMPORTAMIENTO EN SERVICIO.....	12
I.8. PANTALLAS.....	13
I.8.1. PANTALLA SEMICONDUCTORA SOBRE EL CONDUCTOR.....	13
I.8.2. PANTALLA SOBRE EL AISLAMIENTO.....	14
I.8.2.1. PANTALLA SEMICONDUCTORA SOBRE EL AISLAMIENTO.....	20
I.8.3 PANTALLA METÁLICA.....	20
I.8.4. APLICACIONES DE LAS PANTALLAS.....	23
I.8.5. CONEXIÓN A TIERRA Y TERMINACIÓN DE LAS PANTALLAS.....	24
I.9. ACCESORIOS.....	25
I.9.1. EMPALMES.....	25
I.9.2. CLASIFICACIÓN Y TIPO DE EMPALMES.....	26

**TEMA****PÁGINA**

III.1.5. NORMA ICEA S-66-524 Y ICEA S-68-516.....	65
III.1.6. NORMA IEEE 576.....	66
III.2. EFECTOS DE LA PRUEBA DE C.D EN CABLES CON AISLAMIENTO XLP Y EP.....	67

**CAPÍTULO IV****“PRUEBA Y DIAGNÓSTICO DE CABLES CON AISLAMIENTO SECO CON UNA TENSIÓN A 0.1 HZ**

IV.1. PRUEBA Y DIAGNÓSTICO DE CABLES CON AISLAMIENTO SECO.....	69
IV.1.2. PRUEBA DE TENSIÓN DE CABLES CON AISLAMIENTO SECO .....	69
IV.2. OBJETIVO DE LA PRUEBA. EL DIAGNÓSTICO Y MEDICIÓN DE DESCARGAS PARCIALES CON AISLAMIENTO SECO.....	70
IV.3. LOS MECANISMOS DE ENVEJECIMIENTO EN LOS CABLES CON AISLAMIENTO SECO.....	71
IV.4. REQUERIMIENTOS QUE DEBE CUMPLIR UN MÉTODO DE PRUEBA CON TENSIÓN PARA CABLES CON AISLAMIENTO SECO.....	71
IV.5. PRUEBAS CON TENSIÓN CONTINUA.....	72
IV.6. PRUEBA A 60 HZ.....	73
IV.7. PRUEBA A 0.1 HZ.....	74
IV.8. MEDICIÓN DEL FACTOR DE DISIPACIÓN CON UNA TENSIÓN SENOIDAL DE 0.1 HZ.....	75
IV.9. MODLO DE ARBORESCENCIA DE AGUA SIMPLIFICADO CON ESQUEMA EQUIVALENTE.....	76
IV.10. PRINCIPIO DE MEDIDA DEL FACTOR DE PÉRDIDAS.....	80
IV.11. REALIZACIÓN DE LA MEDICIÓN DEL FACTOR DE PÉRDIDAS.....	81

## **INTRODUCCIÓN**

Se reconoce que la vida de los equipos y accesorios depende básicamente de sus aislamientos, por ello uno de los objetivos de las pruebas es verificar el comportamiento de los equipos bajo las condiciones a las que pueden ser expuestas durante su vida útil. Dichas condiciones son:

- a) Temperatura de operación y calentamiento producido por la corriente de carga, corriente de sobrecarga, corriente de corto circuito, etc.
- b) Ciclos térmicos debidos a los ciclos de carga y sobrecarga.
- c) Sobretensiones permanentes (regulación, efecto Ferranti).
- d) Sobretensiones transitorias (por descarga atmosférica y maniobra)
- e) Propias del aislamiento:
  - Resistencia de aislamiento en función de la temperatura.
  - Estado del aislamiento (sucio, seco, húmedo), fracturado, con cavidades, dañado por impacto físico, por elongación durante la instalación, etc.

El objetivo de la coordinación de aislamientos es, diseñar un aislamiento capaz de operar satisfactoriamente bajo las condiciones estables y transitorias que se presentan en los sistemas de potencia, minimizar daños e interrupciones en el servicio que implican pérdidas económicas y mala calidad en el suministro de la energía. Para lograr esto, se tiene que tener las siguientes características:

1. - Tensión.- Sujetar a prueba el equipo del sistema de potencia a magnitudes y frecuencias probables debidas a descargas atmosféricas (rayo), operaciones de interruptores (maniobra), etc., considerando cómo estos fenómenos se distribuyen dentro, en medio, fuera y entre los componentes de potencia (cables, transformadores, generadores, etc.)

2. - Resistencia.- Conservar la resistencia de aislamiento en diferentes tipos de aislantes (sólido, líquido o gaseoso), quien se encargará de conservar la integridad eléctrica del sistema.

3.- Temperatura.- La cual hace cambiar las propiedades eléctricas como el factor de disipación y también a las propiedades mecánicas y químicas.

4. - Protección.- Dispositivos o aparatos que eliminen los daños o reducen sus efectos (apartarrayos, reveladores, varistores, etc.)

5. - Economía.- Considerar los puntos anteriores (1,2,3,4) que lleven a una solución adecuada y económica.



## **CAPÍTULO I**

**“CABLES DE ENERGÍA CON AISLAMIENTO XLP Y EP”.**

En el sistema Edison uso los cables a base de gutapercha, fracasó debido a las altas temperaturas de operación. El alto costo inicial y el mantenimiento de esta red hace que estas se desarrolle únicamente en los lugares de alta densidad de carga.

En 1835 Westinghouse comercializa el sistema de corriente alterna, sobre líneas aéreas; popularizándose por su bajo costo y poco mantenimiento. La primera instalación de este sistema a grande escala se instala en Búfalo, N. Y. en 1886.

Al ser prohibidas en Washington y Chicago las líneas aéreas se impulsa la investigación sobre sistemas subterráneos, en el año de 1887. Haciéndose un gran número de experimentos sobre el trabajo de cables en altos voltajes; hasta 1888 no se ha encontrado el aislamiento para operación correcta a 2000 volts, abandonándose en Chicago la mayoría de las líneas subterráneas.

Más tarde y después de muchos experimentos la Comisión de Caminos Subterráneos de Nueva York adopta el recubrimiento de hule, instalando los cables en ductos para circuitos de alumbrado público éste método es adoptado en varias ciudades.

Las líneas instaladas con cable recubierto de hule, son substituidas al cabo de los años por cables aislados con papel y protección exterior, algunos se instalan en tubos Conduit para liberarlos de humedad, otros se sumergen en aceite, resultando muy costoso este método por su mantenimiento.

La primera línea aislada con papel, fue instalada por Ferranti en 1899 entre las estaciones de Deptford y Londres, para operación a 1000 volts. Consistió en dos conductores concéntricos aislados con una tira ancha de papel manila aplicada en espiral y saturada con resina basándose en aceite. Este cable estuvo en uso hasta 1924 operando a voltaje normal.

El cable con aislamiento de papel y protección exterior de plomo, se comercializa para sistemas de distribución y alumbrado público, permitiendo tensiones hasta de 25 KV. Dando lugar a un aumento de instalaciones subterráneas a partir de principios del siglo XX. Actualmente la Compañía de Luz y Fuerza del Centro sigue utilizando los cables aislados con papel impregnado, tanto en circuitos de baja tensión como de media tensión.

En la Ciudad de México, no obstante las dificultades propias del subsuelo los sistemas de cables subterráneos para distribución y alumbrado han tenido un gran desarrollo. Desde principios del siglo las necesidades propias de la ciudad han dado incremento a la instalación de cables subterráneos de distribución principalmente en el primer cuadro y zonas comerciales. Entre las primeras instalaciones se tiene la del alumbrado de la calle de Madero, la cual data de 1904.

Por largo tiempo materiales como papel impregnado de materiales viscosos se han ocupado como aislamiento en cables a tensiones de 60 KV. Esta técnica dio grandes resultados con adecuados métodos de producción. A través del tiempo se presentaron dificultades, se recurrieron a técnicas como: papel impregnado de aceite, papel impregnado de material viscoso manteniendo gas a presión, etc., en cuestiones de seguridad tuvo gran éxito para tensiones de esta clase, sin embargo se necesitaba de complicados equipos que incrementaban el costo considerablemente de la instalación y mantenimiento. Haciendo un análisis, se toma la decisión de optar por las técnicas más sencillas y económicas (polietileno) salvo los casos especiales.

En el caso de los cables convencionales (aislamiento de papel impregnado de aceite) sufre efectos de calentamiento y enfriamiento, que causa grandes diferencias en los niveles de voltaje de la red. Los resultados de este fenómeno causarían sobre presión o secado del aislamiento. Para evitar éstas desventajas se buscaron alternativas de materiales aislantes que no requiriera ningún tipo de impregnación, como los que se tenían hasta ese tiempo que eran exitosos para baja y media tensión.

## **1.2. ANTECEDENTES DEL POLIETILENO.**

Este aislamiento termoplástico descubierto en Gran Bretaña en 1933 está hecho de la polimerización del etileno. Entre los materiales aislantes que no requieren de algún tipo de impregnación, el polietileno es el más adecuado, por sus características dieléctricas y su precio razonable. En 1955 un grupo de investigadores realizaron estudios sobre el polietileno como aislante en cables de medio voltaje. En 1960 se produjo un cable de 30 KV con longitud de 1440 metros, y fue comisionado a las compañías Haould-EI-Amra y Hassi-Messaoud, en el área del Sahara. En 1962 se produjo el primer cable de 63 KV de este tipo; desde entonces una gran cantidad de instalaciones se han llevado a cabo con este tipo de cables y muchos países alrededor del mundo han realizado investigaciones en esta rama, su primer cable de las compañías Arabes fue puesto en servicio en Diciembre de 1962 para un voltaje de 69 KV.

## **1.3. VENTAJAS DEL AISLAMIENTO SECO.**

Los cables sin materiales impregnados poseen una gran ventaja, comparada con los de papel impregnado de aceite o con los de aislamiento impregnado de material viscoso manteniendo gas a presión, ya que no requieren de un costoso equipo de instalación y su operación es más sencilla, esto es muy importante ya que la mayoría de los cables de distribución se instalan en áreas ya construidas. Para este tipo de cables las modificaciones y reparaciones son más sencillas y pueden ejecutarse sin algún riesgo.

## **I.5. FABRICACIÓN Y REVISIÓN.**

El proceso para elaborar el semiconductor de polietileno como el aislamiento la cual asegura una homogeneidad para evitar posibles películas de gas o aire las cuales se ionizarán. Para asegurar que los cables cumplan con una calidad rigurosa se hace una constante revisión durante la etapa de fabricación, revisando la operación la cual permitirá eliminar impurezas. Esto se realiza tomando una muestra de algunos centímetros.

## **I.6. COMPARACIÓN DE AISLAMIENTOS**

Dada la diversidad de tipos de aislamientos que hasta la fecha existen para cables de energía, el diseñador deberá tener presentes las características de cada uno de ellos, para su adecuada selección tanto en el aspecto técnico como en el económico.

Los aislamientos se pueden dividir en dos grupos principales:

A) *DE PAPEL IMPREGNADO*. Emplea un papel especial obtenido de pulpa de madera, 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 los compuestos que se listan a continuación y la que se elija dependerá de la tensión y de la instalación del cable.

1. Aceite viscoso
2. Aceite viscoso con resinas refinadas
3. Aceite viscoso con polímeros de hidrocarburos
4. Aceite de baja viscosidad
5. Parafinas microcristalinas del petróleo

El compuesto ocupa todos los intersticios, eliminando las burbujas de aire en el papel y evitando así la ionización en servicio. Por esto el papel ha sido por años uno de los materiales más usados en cables de alta tensión y en cables de extra alta tensión.

El compuesto podrá ser migrante o no migrante, de acuerdo al tipo de instalación del cable: con poco desnivel (hasta 10 m) para el primer tipo y con desniveles mayores para el segundo.

Sus propiedades, ventajas y desventajas en comparación con los aislamientos secos, aparecen en la tabla 1.

Al observar la tabla anterior podemos decir que las características técnicas entre el aislamiento tipo XLP y el tipo EP ambas son buenas; pero si hablamos de flexibilidad el tipo EP está por arriba al XLP y esta es una de las razones por el cual se utiliza el EP.

B) *AISLAMIENTOS DE TIPO SECO*. A excepción hecha del hule natural (ya en desuso), los aislamientos secos son compuestos cuya resina base se obtiene de la polimerización de determinados hidrocarburos. Según su respuesta al calor se clasifican en dos tipos:

1. *Termoplásticos*.- Son materiales orgánicos sintéticos obtenidos por la polimerización, al calentarse, su plasticidad permite conformarlos a voluntad, recuperando sus propiedades iniciales al enfriarse, pero manteniendo la forma que se les imprimió.

El polietileno, se obtiene por polimerización del gas etileno, tiene excelentes características como aislante eléctrico: rigidez dieléctrica comparable a la del papel impregnado y pérdidas dieléctricas menores. Tiene también una conductividad térmica mayor que el papel impregnado, lo que facilita la disipación del calor. Sin embargo, debido a las imperfecciones producidas en el aislamiento durante el proceso de aplicación por extrusión, que en el caso del polietileno se agravan por un alto coeficiente de expansión térmica, puede producirse deterioro del aislamiento debido a descargas parciales producidas por ionización\*. Otra desventaja del polietileno es su punto de fusión bastante bajo, por esto, se han desarrollado el polietileno de alta densidad y el polietileno vulcanizado o de cadena cruzada.

2. *Termofijos*.- Los aislamientos agrupados bajo el nombre de termofijos están constituidos por materiales que se caracterizan porque, mediante un proceso de vulcanización, se hace desaparecer su plasticidad y se aumenta la elasticidad y la consistencia mecánica.

El etileno-propileno, conocido comercialmente con las iniciales EPR (ethylene propylene rubber), es un hule sintético de desarrollo reciente, que tiene cualidades dieléctricas próximas a las del polietileno pero mayor resistencia a la ionización y una temperatura de operación de 90° C. Los cables aislados con etileno-propileno se aplican especialmente a circuitos de alta tensión en instalaciones industriales.

---

\* Descargas parciales. Apéndice A

Se reconoce con amplitud que la presencia de agua representa la condición ambiental más severa que se pueda encontrar en servicio, para cualquier tipo de material (EP, XLP, PE, PVC, etc.) que se utilice como aislamiento en cables de energía.

En particular, se sabe que los cables aislados con XLP o EP, y complementados con pantalla sobre el aislamiento basándose en cintas textiles semiconductoras, son susceptibles a la formación de arborescencias cuando se instalan en lugares húmedos. Y, si bien con el uso de semiconductores extruídos parece haber disminuido la incidencia de las fallas de este tipo, en pruebas de larga duración en agua se han encontrado que se continúan desarrollando arborescencias potencialmente peligrosas.

## **I.8. PANTALLAS.**

Cuando se aplica una tensión entre un conductor eléctrico y el plano de tierra (o entre dos conductores), el dieléctrico intermedio se somete a esfuerzos eléctricos. Estos esfuerzos, si son de magnitud elevada, pueden producir deterioro del material del dieléctrico y producir otros efectos indeseables al no controlarse en forma adecuada. El control de los esfuerzos se obtiene de las pantallas eléctricas. Se aplican las pantallas en los cables de energía con el fin de confinar en forma adecuada el campo eléctrico a la masa de aislamiento del cable o cables. Estas dependiendo de su material y localización tendrán una función por ejemplo:

- Pantalla semiconductora sobre el conductor
- Pantalla sobre el aislamiento

### **I.8.1. PANTALLA SEMICONDUCTORA SOBRE EL CONDUCTOR.**

Para tensiones mayores de 2 KV se utilizan pantallas semiconductoras a base de cintas extruídas. Los materiales dependen del diseño del cable: por ejemplo, para cables con aislamiento de papel impregnado se usan cintas de papel CB (Carbon Black), en cables con aislamiento sólido se utilizan pantallas extruídas de material compatible con el utilizado en el aislamiento. La función primordial de este tipo de pantallas es, evitar concentraciones de esfuerzos eléctricos que se presentan en los intersticios\* de un conductor cableado, a consecuencia de los hilos. La inclusión de este elemento en el diseño del cable es con el fin de obtener una superficie equipotencial uniforme.

---

\* Glosario.

A) *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 los 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. Una distribución no uniforme conduce a un incremento de estos esfuerzos en porciones del cable, por ejemplo descargas parciales, con el consecuente deterioro.

En la figura 5a se muestra una distribución desigual de esfuerzos; incluso en este ejemplo, los rellenos de los intersticios del cable quedan sometidos a esfuerzos eléctricos para los que no están diseñados.



Figura 5 a) Cable sin pantalla b) Cable con pantalla

Esfuerzos tangenciales y longitudinales.

Uno de los principios básicos de los campos eléctricos es que al aplicar una tensión a dieléctricos colocados en serie, con diferente permitividad relativa,  $K_1 \neq K_2$ , se dividirá en razón inversa a las permitividades relativas de ambos materiales de ambos materiales.

En el caso de los cables de energía desprovistos de pantalla, la cubierta y el medio que rodean al cable forman un dieléctrico en serie con el aislamiento. Una porción de la tensión aplicada se representará en este dieléctrico, la cual será igual al potencial que se presentará en la superficie del aislamiento. Esta tensión superficial podría alcanzar el

La intensidad de campo eléctrico a esa misma distancia  $x$  está dada por la expresión:

$$E = \frac{D}{k \epsilon_0} \text{ newtons / coulomb} \quad (1.2)$$

Donde  $\epsilon_0$  es la permitividad del espacio vacío ( o constante eléctrica del vacío):

$$\epsilon_0 = \frac{1}{36\pi * 10^9} \quad (1.3)$$

y  $k$  es la constante dieléctrica del aislamiento.

Substituyendo en la expresión (1.2) los valores de  $D$  y  $\epsilon_0$  dados por las expresiones (1.1) y (1.3), se tiene:

$$E = 18 * 10^9 * \frac{q}{xk} \text{ newtons / coulomb} \quad (1.4)$$

El gradiente de potencial en cada punto del campo eléctrico es igual a la intensidad de campo eléctrico en ese punto con signo cambiado:

$$-\frac{dV}{dx} = E = 18 * 10^9 * \frac{q}{xk} \text{ volts / m} \quad (1.5)$$

La diferencia de potencial  $V_n$  entre el conductor y la pantalla, la cual está conectada a tierra, se obtiene realizando la siguiente integración:

$$-\int_{V_n}^0 dV = \frac{18 * 10^9 * q}{k} \int_r^R \frac{1}{x} dx$$

$$V_n = \frac{18 * 10^9 * q}{k} \ln \frac{R}{r} \text{ volts} \quad (1.6)$$

Despejando  $q$  en la ecuación (1.6) y substituyendo en la ecuación (1.5), se tiene la siguiente expresión de la intensidad del campo eléctrico en el dieléctrico del cable, en función de la distancia  $x$  medida a partir del centro del conductor:

$$E = \frac{V_n}{x \ln \frac{R}{r}}$$



*B) Proveer 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 en ductos de características eléctricas variables. Esto da como resultado una capacitancia a tierra variable y, como consecuencia, una impedancia no uniforme.

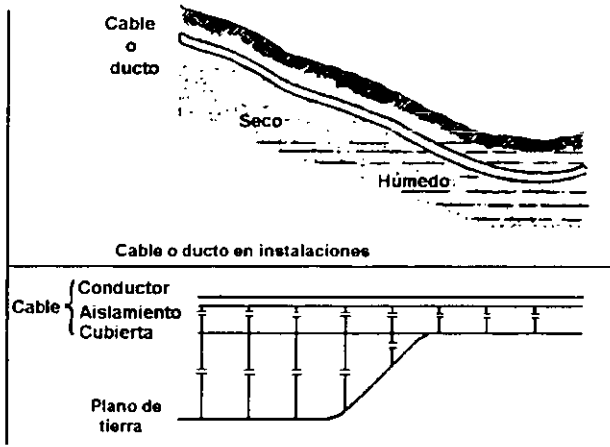


Figura 8 Capacitancia variable a tierra debido a una impedancia no uniforme.

Al colocar las pantallas sobre aislamiento, se tendrán las siguientes ventajas en el cable:

- Presentar una impedancia uniforme, evitando reflexiones y eliminando la posibilidad de producir sobretensiones dañinas al aislamiento.
- Proveer al cable de la máxima capacitancia del conductor a tierra y consecuentemente, reducir al mínimo las ondas de sobretensión.
- Absorber energía de la onda de sobretensión al inducir en la pantalla una corriente proporcional a la del conductor.
- Reducir el peligro de choque eléctrico al personal y proveer un drenaje adecuado a tierra de las corrientes capacitivas.

*(\*) Reducir el peligro de descargas eléctricas al personal o en presencia de productos inflamables.*

Como se ha indicado, cuando la superficie externa del aislamiento de los cables (sin pantallas) no está en contacto con tierra a lo largo de la trayectoria de instalación, se

El diseño de la pantalla metálica se debe efectuar de acuerdo al propósito de diseño, que puede ser:

- a) *Para propósitos electrostáticos.* Estas pantallas deben ser en general de metales no magnéticos y pueden estar constituidas de cintas, alambres o bien pueden ser cubiertas metálicas (plomo o aluminio). Las pantallas constituidas a base de cintas o de alambres son generalmente de cobre normal, aunque pueden utilizarse en ambos casos cobre estañado; éstas últimas se utilizan donde se pudiera prever problemas graves de corrosión derivados de las condiciones de instalación. En la tabla 2 se presenta el cuadro comparativo de pantallas a base de cintas con las de alambres.
- b) *Pantalla para conducir corriente de falla.* En la pantalla metálica se puede requerir una conductancia adicional para conducir corriente de falla, dependiendo de la instalación y características eléctricas del sistema, particularmente con relación al funcionamiento de dispositivos de protección por sobrecorriente, corriente prevista de falla fase a tierra y la manera en que el sistema puede ser aterrizado.
- c) *Pantalla neutro.* Con las dimensiones apropiadas se puede diseñar la pantalla, para que en adición a las funciones descritas opere como neutro; por ejemplo, sistemas residenciales subterráneos.

Las cubiertas metálicas proporcionan al cable una pantalla electrostática adecuada, además de la hermeticidad que se deriva de tener una cubierta continua. Por otro lado la cubierta de plomo por los espesores que se requieren desde el punto de vista mecánico proporciona una conductancia adicional aprovechable para conducir corriente de falla.

A continuación se presenta la relación de ventajas y desventajas de cada uno de los tipos de pantallas.

#### **1.8.4. APLICACIONES DE LAS PANTALLAS.**

Como se mencionó con anterioridad, es necesaria la pantalla en circuitos de 2 KV y mayores. Para tensiones menores no se requiere; también, autores señalan que para cables de 5 KV y mayores requieren de pantallas sobre el aislamiento. Entonces dentro de los límites de 2 KV y 5 KV se puede o no utilizar pantallas sobre el aislamiento, aquí interviene una gran dosis de sentido común para considerar la aplicación de las pantallas. Es innegable que un cable con pantalla, instalado en forma apropiada, ofrece las condiciones óptimas de seguridad y confiabilidad. Pero un cable con pantalla es más costoso y más difícil de cuidar e instalar. A continuación se menciona algunas recomendaciones de aplicaciones donde deberá usarse o evitarse las pantallas, de acuerdo con normas ICEA.

Las pantallas sobre el aislamiento deben ser consideradas para cables de energía arriba de 5 KV, cuando existan cualquiera de las siguientes condiciones:

- a) Conexiones a líneas aéreas
- b) Transición a ambiente de diferente conductancia
- c) Transición de terrenos húmedo o seco
- d) Terrenos secos, de tipo desértico
- e) Conduits anegados o húmedos
- f) En donde se utilizan compuestos para facilitar el jalado de los cables
- g) Donde fácilmente se depositen en la superficie del cable materiales conductores tales como hollín, sales, etc.
- h) Donde pudieran presentarse problemas de radiointerferencia

## **I.9. ACCESORIOS**

Una red eléctrica subterránea no solo esta constituida de cables de buena calidad, también es importante verificar sus accesorios (empalmes y terminales), que deben tener una calidad similar a los cables, ya que en estos sitios es común que se registren fallas. A continuación se describe cada uno.

### **I.9.1. EMPALMES.**

El acabado superficial para la preparación de los accesorios, especialmente en el caso de accesorios encintados o premodelados, es fundamental importancia para el XLP, mientras que para el EP puede ser menos preciso. Según reportes sobre las pruebas de tensión y vida se ha observado gran número de rupturas en terminales no ejecutadas adecuadamente en XLP (pequeñas ondulaciones, raspaduras, cortes, etc.), o en el caso de pantallas de cintas aun con muy pequeñas discontinuidades. Estos problemas nunca se han observado en terminales de cables con EP que presenten defectos similares.

Este fenómeno se debe a la vulnerabilidad del XLP a las descargas parciales originadas en puntos o cavidades sometidas a altos esfuerzos.

Otro factor en relación con el acabado superficial es la resistencia a la absorción de humedad; una vez más, la superficie raspada de cables con EP es menos peligrosa que en el caso de cables con XLP.

La confiabilidad de un empalme para cables depende de varios factores, entre los que se destacan la calidad de los materiales empleados, el diseño y la mano de obra de e instalación. La selección de los materiales debe estar apoyada en pruebas de evaluación para incorporarlos a la geometría del diseño y hacer que los esfuerzos dieléctricos presentes sean de magnitudes tolerables.

Es necesario que en el diseño de empalmes se considere que los materiales utilizados deben ser compatibles con los elementos constructivos del cable que se unirá, y que estos materiales deben efectuar satisfactoriamente la función que desempeñan sus homólogos en el cable.

Uno de los factores que, sin duda tiene gran importancia en el diseño de empalmes es asegurar que los gradientes de esfuerzos presentes en el empalme sean soportables por los materiales utilizados.

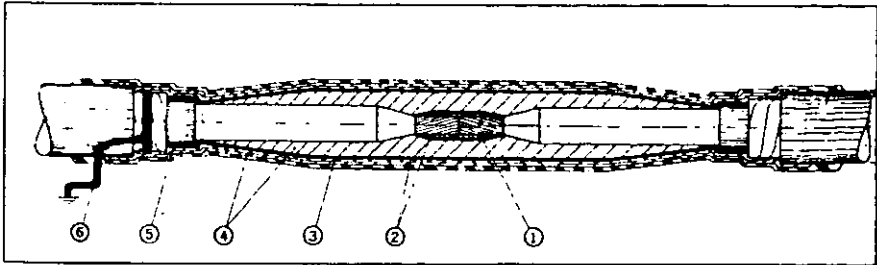


Figura 10 b) Empalme encintado 1. Conector 2. Cinta conductora 3. Malla de cobre 4. Cinta aislante 5. Cinta vinílica con adhesivo 6. Trenza plana estañada

*b) Moldeados en fábrica*

Son aquellos en que los componentes son moldeados por el fabricante. Los componentes se ensamblan sobre los cables por unir, en el lugar de trabajo.



Figura 10c) Empalme modelado en fábrica

**1.9.3. TERMINALES.**

Parte complementaria de los cables utilizados en la distribución de energía eléctrica se encuentran las terminales, estas al igual que los cables y empalmes deben

## **CAPÍTULO II**

### **“PRUEBA DE TENSIÓN DE IMPULSO”.**

- disturbios
- operaciones de conexión y desconexión.

II) Por su forma, las sobretensiones se pueden dividir en:

- c) Sobretensiones permanentes.
- d) Sobretensiones Repentinas.
- e) Sobretensiones Errantes.

- c) Las sobretensiones permanentes, aparecen en circuitos de corriente alterna, con los que intervienen reactancias capacitivas e inductivas y resistencias, que en circunstancias especiales y dependiendo de sus valores con respecto a la resistencia de tierra pueden provocar sobretensiones a la frecuencia del sistema, pero esto se puede evitar con un buen diseño de la red.
- d) Las sobretensiones repentinas, son originadas al variar las condiciones normales de operación de la red, debido a las operaciones de conexión y desconexión, aumentos o disminuciones repentinas de carga y disturbios en el sistema.
- e) Las sobretensiones errantes (viajeras), son aquellas que se desplazan a gran velocidad a lo largo de los conductores, dando lugar a grandes elevaciones de potencial, ya sea porque la tensión propia sea mayor que la de tensión de servicio, o porque se incrementa por reflexión.

Las ondas errantes se forman al aplicar instantáneamente una tensión a un conductor (conmutación de interruptores), produciéndose la corriente de carga del conductor, al mismo tiempo que progresa la tensión a lo largo del conductor, es decir, que se produce en éste una onda de tensión, o por efecto de un rayo que se descarga en la línea o en su vecindad.

Las descargas atmosféricas, provienen de la descarga eléctrica estática de las nubes, las cuales se cargan eléctricamente por el efecto del rozamiento del aire con ellas, formándose una diferencia de potencial entre ellas mismas o con respecto a la tierra, esta diferencia de potencial se neutraliza al manifestarse la descarga eléctrica.

Las descargas atmosféricas alcanzan tensiones del orden de 4000 KV. , pero normalmente no son inferiores a los 100 KV. Estas pueden ser negativas o positivas, pero en un 85% las descargas son de polaridad negativa.

## II.4. SIGNIFICADO DE LA PRUEBA DE TENSIÓN DE IMPULSO.

Para poder comprender el significado que tiene la prueba de tensión de impulso, se analizará rápidamente las propiedades de los materiales aislantes, el nivel básico de impulso (BIL) y la forma de onda normalizada para pruebas de tensión de impulso.

Tensión nominal del sistema Vn KV (eficaz)	Tensión máxima de diseño del equipo KV (eficaz)	Tensión de aguante nominal de Impulso por maniobra (NBAM)		Tensión de aguante nominal de Impulso por rayo (NBAI) de fase a tierra KV (cresta)
		Fase a tierra KV (cresta)	Fase a fase (Relación al valor cresta de fase a tierra)	
400	420	850	1.50	1050
		950	1.50	1175
		1050	1.50	1300
				1425

Tabla 2.1

### a) Propiedades de los materiales aislantes.

Un material aislante, es aquel que tiene una conductividad tan baja, que al someterlo a un campo eléctrico, éste deja pasar una corriente tan baja, que puede despreciarse.

La rigidez dieléctrica de un material aislante es el valor de la intensidad de campo eléctrico al que hay que someterlo para que se produzca una perforación del aislamiento, y depende de la forma de onda de la tensión de prueba y del tiempo de aplicación de la tensión. En general la rigidez dieléctrica es más alta para impulsos de muy corta duración, tiene un valor inferior si la prueba se realiza aplicando una tensión continua y todavía más bajo si la tensión aplicada es alterna. Se expresa de la siguiente manera:

$$R_d = \frac{V}{e} \quad (\text{KV} / \text{mm})$$

Rd = Rigidez dieléctrica

V = Tensión máxima que soporta el material sin perforarse KV.

e = Espesor del material en mm.

Donde Rd, representa la tensión a que se perfora un material aislante con determinado espesor.



También el tiempo de cresta es difícil de determinar, por lo que también se ha convencido, que éste sea el punto "F", que es la intersección de la misma recta que sirve para determinar " $t_0$ ", con el valor de tensión de cresta.

El punto "C" representa el 50% de  $V_M$ , que es alcanzado por la onda en un lapso " $t_c$ ", después de haber alcanzado ésta su valor máximo.

La duración de frente de onda, es el tiempo que tarda la onda en alcanzar el valor de tensión de cresta; las normas CIE lo determinan por el lapso:

$$T_1 = 1.67 (t_q - t_p)$$

La duración de la cola hasta el valor medio, (duración de cola) es el tiempo que tarda la onda en alcanzar el valor de 50% de la tensión de cresta, en la parte de la cola, y está determinado por el lapso de tiempo  $T_2 = t_0 - t_c$ .

Los parámetros que caracterizan a la onda de tensión de impulso son:

- Polaridad (positiva o negativa)
- Valor de cresta (KV).
- Duración de frente ( $\mu\text{seg.}$ )
- Duración de cola ( $\mu\text{seg.}$ )

La notación que describe a una onda de tensión de impulso es: KV -  $t_1$ -  $t_2$ , en primer término tenemos el valor de tensión de cresta expresada en KV, en segundo y tercer término, la duración de frente de onda y la duración de la cola respectivamente, ambas expresadas en microsegundos.

Se usan diferentes tipos de ondas en las pruebas de tensión de impulso, pero todas ellas relacionadas directamente con la onda normalizada, éstas son las ondas reducidas, las ondas cortadas y las ondas completas.

*La onda reducida*, es una onda completa, pero con una valor de tensión de cresta que varía entre el 50% y el 70% del valor de tensión de cresta estipulado (figura 2.6).

*La onda cortada*, es una onda incompleta, cortada por medio de un explosor y puede ser de tres formas diferentes:

- Cortada en el frente (fig. 2.7)
- Cortada en la cresta (fig. 2.8)
- Cortada en la cola (fig. 2.9)

b)  $C_1$  se descarga sobre  $C_2$  a través de una resistencia  $R_1$  en serie.

Al igual que el caso anterior  $C_1$  es previamente cargado a la tensión  $V_1$ , mientras que  $C_2$  está descargado, pero esta vez se intercala una resistencia  $R_1$  en serie (fig. 2.13), que tiene como fin impedir que el capacitor  $C_1$  se cargue bruscamente. Cuando cerramos el interruptor  $S$ , la carga  $Q_1$  se distribuye igual que en el primer caso y una vez estando los capacitores a la misma tensión  $V_2$ , se puede analizar que la distribución de la carga no se efectúa súbitamente, porque la resistencia  $R_1$  impide el paso de la carga de  $C_1$  a  $C_2$ , lo cual retarda el alcanzar la tensión  $V_2$  y es posible demostrar, como se verá más adelante, que la tensión  $V_2$  obedeciendo una ley exponencial, por lo que, el valor final de  $V_2$  se obtiene en un tiempo infinito.

La constante de tiempo, que caracteriza dicha ley exponencial, es  $T_1$  y está dada por el producto de  $R_1$  por la Capacitancia  $C'$ , que resulta de la conexión en serie de los dos capacitores.

$$C' = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2}$$

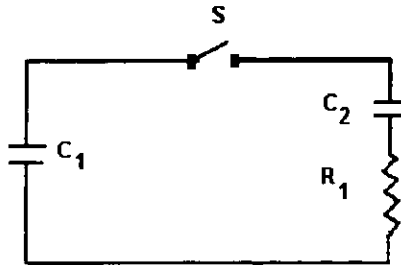


Figura 2.13

La curva característica de la tensión  $V_2$  (fig. 2.14), está determinada por la ecuación:

$$v_2 = V_2 (1 - e^{-t/T_1})$$

Donde  $V_2$  es el valor de la tensión instantánea y  $V_2$  es la tensión final

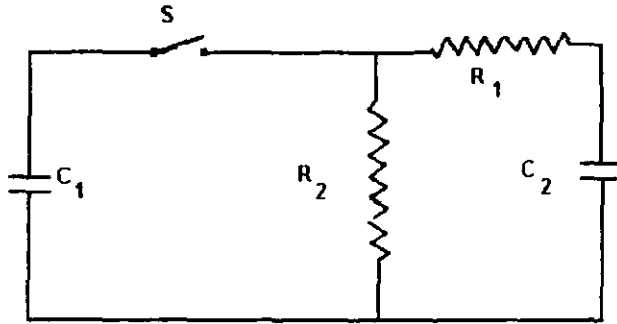


Figura 2.19

Es importante hacer notar, que el rendimiento en ambos circuitos, es inferior que en los casos "b" y "c", por la caída de tensión que corresponde a  $R_2$ .

El rendimiento en los casos b y c, es conocido como rendimiento límite, es decir, corresponde al límite para cuando  $R_1$  es igual a cero y  $R_2$  es igual a infinito.

La curva característica del rendimiento límite, se muestra en la (fig. 2.20), la que está basada en la relación:

$$\eta = \frac{1}{1 + C_2/C_1}$$

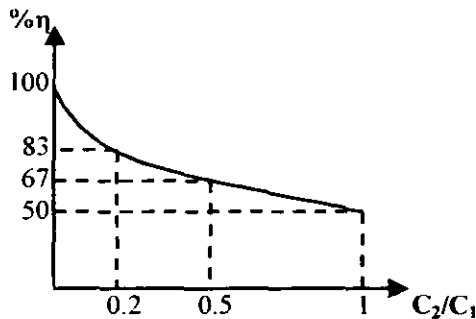


Figura 2.20

Se puede observar que, para un valor de  $C_2 / C_1 = 0.5$ , o sea, que el valor de la capacitancia bajo prueba es igual a la mitad del valor de la capacitancia del generador, el rendimiento límite, en estas condiciones es 0.67 únicamente, por lo que, las normas

## **CAPÍTULO III**

### **“PRUEBAS EN CAMPO CON C.D. PARA CABLES DE MEDIA TENSIÓN”.**

### III.1.4. NORMA (ICEA) INSULATED CABLE ENGINEERS ASSOCIATION.

Ambas normas "ICEA S-68-516 y S-66-524" declaran que "si se aplican pruebas después de instalación, estas deben realizarse inmediatamente antes de energizar el cable para su trabajo normal". La prueba es con C.D. con una duración de 15 minutos. Allí no da referencia de alguna prueba de mantenimiento. Estas normas van dirigidas con el propósito de usarse en varios tipos de instalaciones, por lo tanto, tendrían que ser generales señalando únicamente especificaciones en la instalación.

La ICEA ha realizado una nueva norma llamada "Standard S-94-649, standard of Concentric Neutral Cables Rated 5 through 46 KV". Esta norma sigue los seguimientos de la AEIC CS5 referida a cables tipo XLP, y especifica 5 minutos durante la instalación, 15 minutos después de la instalación antes que se ponga en servicio, y 5 minutos en servicio. Para los 5 primeros años, se usan los mismos voltajes del EPR y XLP pero difiere a la AEIC CS6 ya que tiene valores mayores para el EPR.

### III.1.5. VOLTAJES DE PRUEBA EN CAMPO PARA XLP ICEA S-66-524 Y PARA EPR ICEA S-68-516

VOLTAJE DEL SISTEMA (KV)	PRUEBAS DE ACEPTACIÓN EN C.D.	
	CON 100% DE NIVEL DE AISLAMIENTO	CON 133% DE NIVEL DE AISLAMIENTO
5	25	25
8	35	35
15	55	65
25	80	100
28	85	----
35	100	----

Las siguientes recomendaciones fueron realizadas por el EPRI de acuerdo a los reportes de las compañías que utilizan cable tipo XLP con un nivel de aislamiento del 100% para una tensión de 15 KV.

1. No se recomienda hacer pruebas de mantenimiento con C.D. a cables tipo XLP a una tensión de 40 KV que hallan fallado estando en servicio y después reenergizarlos nuevamente. No es prudente aplicar 40 KV de C.D. a cables XLP que envejecidos por arborescencias.
2. Puede aplicarse 70 KV de C.D a cables nuevos con objeto de determinar imperfecciones de manufactura.
3. En pruebas de campo puede aplicarse un voltaje de 55 KV de C.D. a un cable nuevo, antes de energizarse y no haya sido conectado al sistema.

- La tensión de prueba debe poderse generar con una magnitud y calidad suficientes.
- El generador de tensión de prueba debe ser fácilmente transportable.
- La tensión de prueba debe de ser adecuada, por una parte, para la detección de deterioros locales que comprometen la operatividad del cable y por otra, no deteriorar más las zonas ligeramente envejecidas o no dañadas del mismo.
- La tensión de prueba debe provocar, en el transcurso de la duración especificada para la prueba, la perforación en las arborescencias eléctricas existentes (alta velocidad de crecimiento de los canales).
- Aparte de la prueba debe ser también posible efectuar un diagnóstico.

A continuación se listan las principales ventajas y desventajas de cada uno de los métodos más usados.

#### **IV.5. PRUEBA CON TENSIÓN CONTINUA:**

La prueba más simple para cables con aislamiento de papel aceitado es la prueba con tensión continua, por lo que el equipo de prueba con tensión continua sigue estando plenamente justificado para las redes compuestas exclusivamente de cables con aislamiento de papel aceitado.

##### **VENTAJAS:**

- Se requieren potencias relativamente reducidas.
- En consecuencia, los equipos de pruebas son sencillos, ligeros y económicos.

##### **DESVENTAJAS:**

- Niveles de prueba altos (6-8  $U_0$ )
- Cuando el cable presenta humedad y se aplica la prueba de tensión con C.D. de acuerdo con las normas del capítulo III, en el cable se presentará el fenómeno de electrólisis. El campo eléctrico que está en el material polimérico mas la humedad, ello conllevará al rápido crecimiento de canales de las arborescencias las cuales deteriorarán el aislamiento del cable.

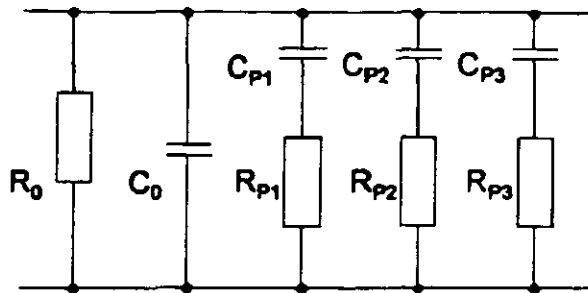


Figura 4.3. Esquema dieléctrico equivalente de un cable nuevo

Donde :  $R_0$  Resistencia de fuga  
 $C_0$  Capacidad ideal del cable  
 $C_{pn}$   $R_{pn}$  Constantes de tiempo de los procesos de polarización.

Una arborescencia de agua se puede representar de forma simplificada como un circuito RC (en la figura 4.4.  $R_2$   $C_2$ ) suplementario, con característica dependiente de la tensión, conectado en paralelo con los circuitos R-C que representan los mecanismos de polarización del cable nuevo. En el cable se producen disipaciones adicionales, que en consecuencia incrementan también el valor absoluto del factor de disipación a la tensión de servicio.

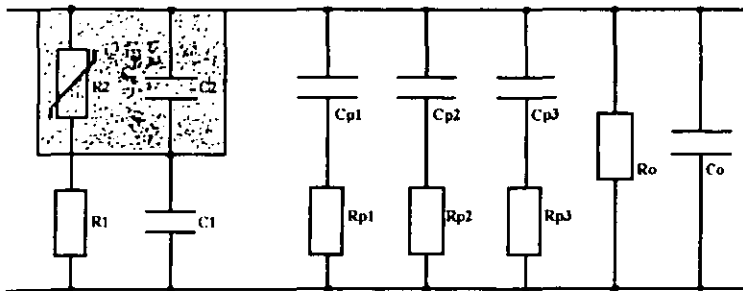


Figura 4.4. Esquema dieléctrico equivalente de un tramo de cable envejecido por arborescencias de agua.

A medida que se aumenta la tensión los canales de la arborescencia de agua se vuelven más conductores, y en consecuencia producen una reducción de la constante de tiempo correspondiente ( $R_2$   $C_2$ )



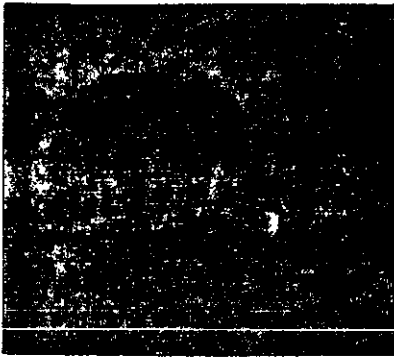


Figura 4.7. Arborescencia tipo "Bush" Arbusto



Figura 4.8. Arborescencia tipo "Bow-tie" Moño

Si ahora se estudia en un modelo el factor de disipación local ( $\tan \delta_{loc}$ ) en función de los parámetros desconocidos profundidad de la arborescencia  $d = r_3 - r_2$  y constante de tiempo  $\tau = R_2 * C_2$ , se obtiene el gráfico de la figura 4.9.

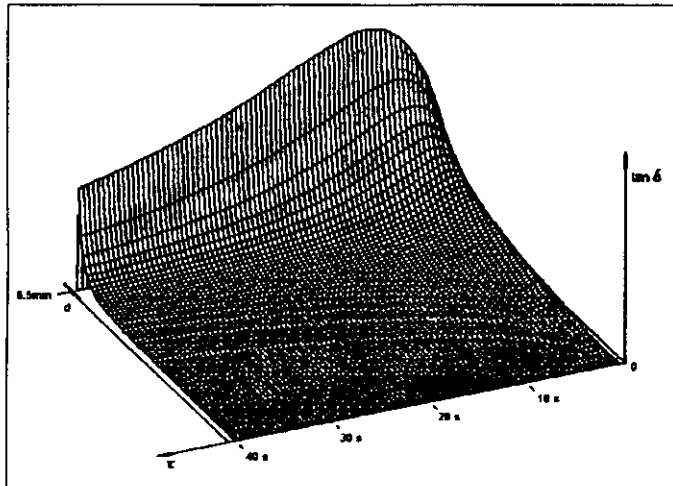


Figura 4.9.. Factor de disipación local  $\tan \delta_{loc}$  en función de la profundidad del daño  $\delta_{loc}$  (0; r3-r1) y de la constante de tiempo  $\tau$  (0;40s)

En este modelo se aprecia que la sensibilidad de medida del factor de disipación a 0.1 Hz es máxima en aquellos procesos cuyas constantes de tiempo se sitúan dentro del rango de 5-10 s. Aparte de esto, la dependencia claramente no lineal de la profundidad  $d$  del deterioro, lo cual significa que el factor de disipación local sólo puede quedar

afectado por arborescencias de agua importantes. Los daños menos importantes (arborescencias de agua cortas) apenas tienen efectos apreciables, pero las arborescencias de agua desarrolladas tienen unos efectos muy acusados.

Dado que, tal como han demostrado los estudios, con niveles de tensión bajos las constantes de tiempo de las arborescencias de agua que determinan la vida útil se sitúan claramente por encima de los 10 s, una reducción de la constante de tiempo  $t$  derivada del aumento de tensión conlleva un incremento de la  $\tan \delta$ .

Por esta razón, tanto el valor absoluto de la  $\tan \delta$  como la variación debida al nivel de la tensión de ensayo, son determinantes para la evaluación del estado del aislamiento.

Todos los métodos de diagnóstico disponibles en la actualidad son *integradores*, es decir, que presenta la dificultad de base que es detectar arborescencias singulares de agua, particularmente en los cables de gran longitud, que quedan ocultados por la zonas no deterioradas. Aún así la medición del factor de disipación resulta realmente selectiva, porque, por una parte, las zonas ya relativamente pequeñas fuertemente deterioradas tienen efectos relevantes sobre el factor de pérdidas al evaluar relativamente largos y, por otra, la dependencia del factor de pérdidas con respecto a la tensión proporciona una segunda magnitud de evaluación que corresponde al envejecimiento por arborescencias de agua. Las consideraciones teóricas quedan confirmadas por las experiencias prácticas hechas con el diagnóstico de cables.

#### **IV.10. PRINCIPIO DE MEDIDA DEL FACTOR DE PÉRDIDAS.**

Durante el diagnóstico se mide la tensión a través de un divisor óhmico y la corriente que fluye a través del cable con un condensador de medida. Mediante un análisis de FOURIER y la consiguiente evaluación de las ondas fundamentales de ambas señales de medida se determina el ángulo de pérdidas y se calcula el factor de disipación.

Dado que la medición del factor de disipación en cables tendidos se debe realizar con el cable puesto a tierra, afectan al valor de medición todas las corrientes de defecto entre la alta tensión y los elementos puestos a tierra. Por esta razón se ha incorporado un cable adicional VSE, para desviar hacia el aparato todas las corrientes de fuga provenientes de los cables de alimentación, las superficies y los tramos de aislamiento. El cable VSE es mantenido artificialmente al potencial de tierra (tierra virtual), a pesar de lo cual deriva las corrientes de fuga separándolas del circuito capacitivo de medición de la corriente.

Para la medición son importantes los factores siguientes:

1. Supresión de arcos eléctricos en el circuito de prueba y medida.
2. Supresión de las corrientes superficiales en los conos terminales

Como puede verse por la fórmula (4.4), las pérdidas dieléctricas son directamente proporcionales a la capacitancia y por lo tanto a la constante dieléctrica del aislamiento, al factor de disipación dieléctrica que puede considerarse igual al factor de potencia del aislamiento y al cuadrado de la tensión aplicada. Además, el factor de potencia varía en función de la temperatura; para temperaturas superiores a la temperatura de operación de los distintos tipos de aislamiento el factor de potencia del aislamiento aumenta al aumentar la temperatura.

En los cables de baja tensión las pérdidas dieléctricas no tienen importancia pero en los cables de alta tensión son uno de los principales factores que limitan la capacidad de transmisión. Por esta razón es necesario en estos cables reducir lo más posible la constante dieléctrica y el factor de pérdidas del aislamiento.

El factor de potencia de un aislamiento aumenta al absorber humedad. La medición del factor de potencia de un aislamiento es el procedimiento más efectivo para detectar la absorción de humedad y el grado de deterioro del aislamiento. El factor de potencia de un aislamiento:  $\cos\phi$ , o más precisamente, el factor de disipación dieléctrica:  $\tan\delta$ .

#### **IV.13. EXPERIENCIAS PRÁCTICAS CON LA MEDICIÓN DEL FACTOR DE DISIPACIÓN.**

A continuación se narra algunas experiencias de compañías suministradoras de energía eléctrica que han experimentado la prueba de tensión a frecuencia de 0.1 Hz.

A parte de algunas empresas holandesas y belgas hay también compañías eléctricas alemanas que trabajan desde hace años con éxito con la tensión de prueba senoidal a 0.1 Hz y el diagnóstico mediante medición del factor de disipación. La mayor parte de los conocimientos recogidos sobre las posibilidades y limitaciones de la medición del factor de disipación se derivan en las experiencias individuales de dichas empresas.

Las empresas han desarrollado y aplicado diferentes criterios de evaluación en función de las respectivas circunstancias de servicio y estrategias de mantenimiento.

##### **1) Las experiencias de la compañía eléctrica EWE AG, de Oldenburgo (Alemania):**

EWE AG, de Oldenburgo, una reputada compañía eléctrica del norte de Alemania, que explota una red de distribución de 20 KV, que incluye 7500 Km de cable con aislamiento seco (datos de 1992), es uno de los usuarios más experimentados en este sistema de medición. Entre 1988 y 1990 se produjeron frecuentemente averías en cables

## **CONCLUSIONES**

## **APÉNDICE A**

- A.1) Descargas parciales internas.
- A.2) Descargas parciales superficiales.
- A.3) Descargas parciales por efecto corona

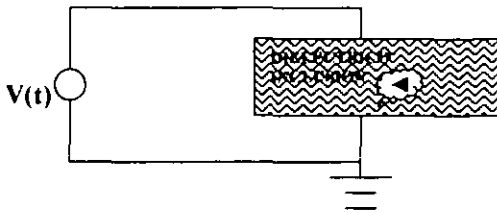


Figura A.1 Descargas parciales internas, por la presencia de burbujas de gas, cavidades de aceite o partículas extrañas

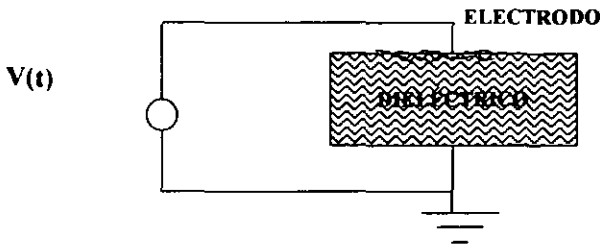


Fig. A.2 Descargas parciales superficiales, por la presencia de esfuerzo dieléctrico paralelo a la superficie del dieléctrico

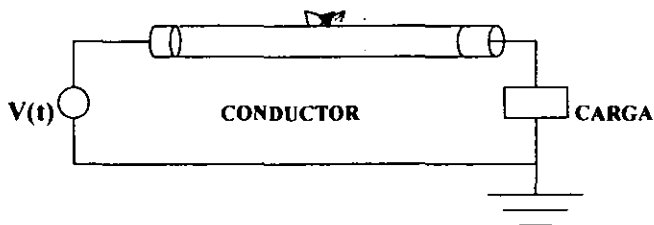


Fig. A.3 Descargas parciales por corona, por concentraciones de campo eléctrico en la superficie de un conductor

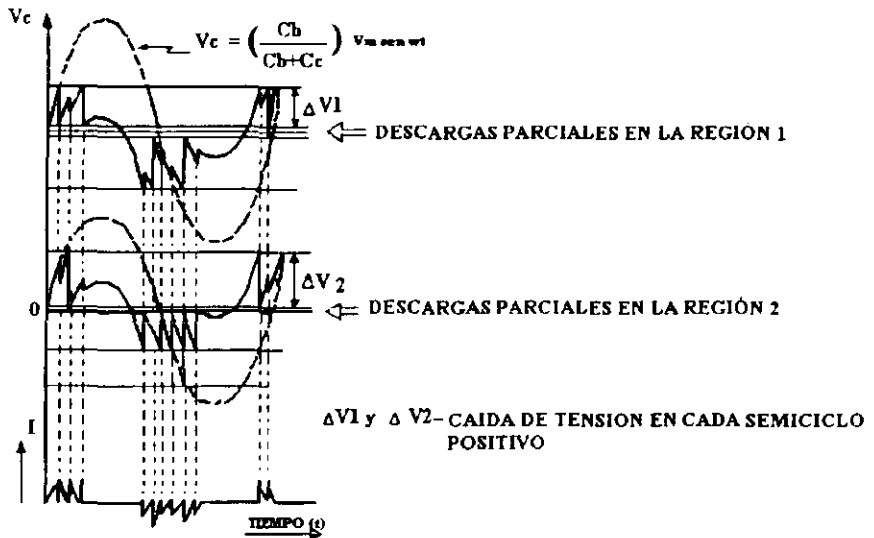


Figura A.9 Interacción de descargas parciales en dos regiones de una burbuja gaseosa grande, debido a fuga transversal de carga, cuando se aplica tensión de corriente alterna a un dieléctrico.

## A.9. MECANISMO DE OCURRENCIA CON TENSION DE IMPULSO.

El mecanismo de ocurrencia del fenómeno de descargas parciales con tensión de impulso por rayo (onda unidireccional) o por maniobra (onda unidireccional u oscilatoria amortiguada), se presenta cuando la intensidad de campo eléctrico en la cavidad, excede su rigidez dieléctrica de tal manera que la cavidad queda puenteadada eléctricamente por la descarga parcial, tal como se muestra en la figura A.10.

Cuando a los aislamientos de un equipo se les somete a una tensión de impulso  $e(t) = E_t (e^{-\alpha t} - e^{-\beta t})$ , se tiene inicialmente una diferencia de potencial "Vc" a través de la cavidad: sin embargo, si la cavidad no es capaz de soportar dicha tensión se origina el primer impulso de la descarga parcial en la cavidad, a una tensión mucho mayor que la tensión de inicio de descargas parciales, este valor se debe a que existe una probabilidad de ocurrencia pequeña, de que el electrón se sitúe en la cavidad gaseosa, por el fenómeno de radiación natural. La tensión en la cavidad decae rápidamente durante la descarga parcial a una tensión remanente "Ve" (usualmente se considera despreciable) y una vez que la descarga parcial desaparece, toma la forma de onda de la tensión aplicada. Como la forma de onda de la tensión de impulso decae con el tiempo, esto origina una reducción de las cargas del fenómeno de polarización y un incremento en sentido opuesto de la tensión en la cavidad. Cuando la tensión inversa a través de la cavidad adquiere el

valor de  $-V_i$ , se presenta el fenómeno de descarga parcial inversa y la tensión se abate a un valor pequeño  $-V_e$ . Dicho fenómeno se repite varias veces hasta que la magnitud de la tensión aplicada se hace cero, dando como resultado una tensión inversa  $V'_R$  a través de la cavidad gaseosa, que decae a cero con el tiempo; tal como se observa en la figura A.11.

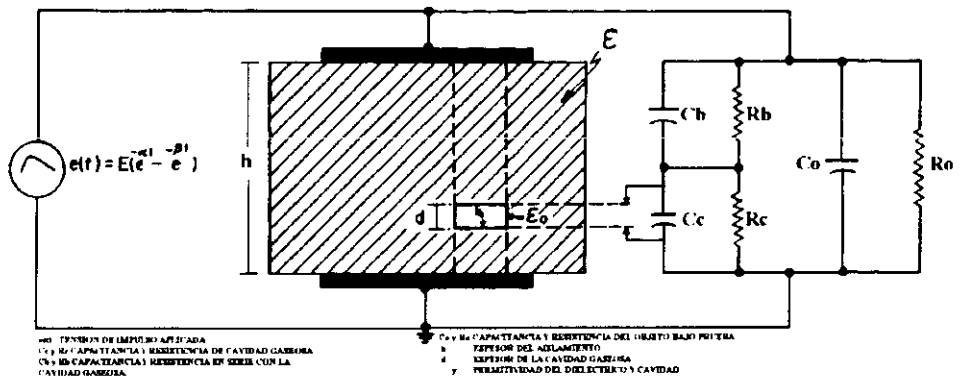


Figura A.10 Representación de una cavidad gaseosa en un dieléctrico y su diagrama eléctrico equivalente, con tensión de impulso.

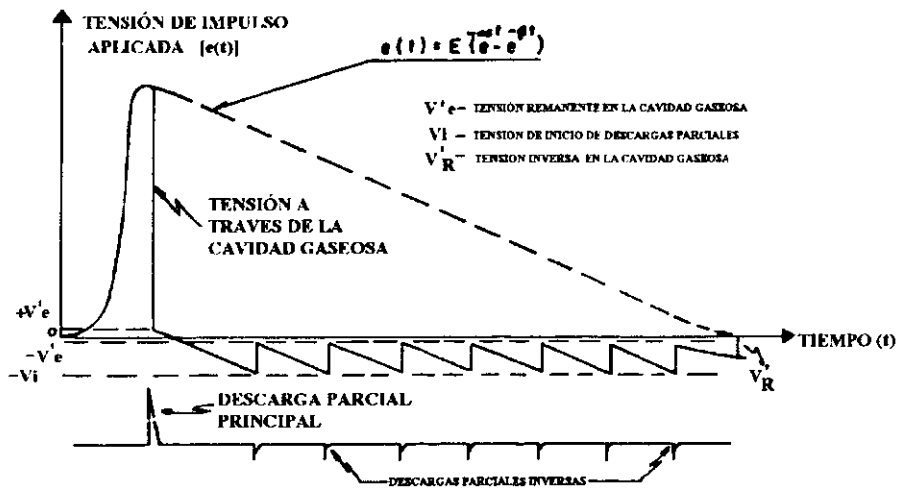


Figura A.11 Mecanismo de ocurrencia del fenómeno de descargas parciales en un dieléctrico, con tensión de impulso.



En la figura A.12 se muestra la representación de una cavidad gaseosa en un dieléctrico con su diagrama eléctrico equivalente y en la figura A.13 se observa el mecanismo de ocurrencia del fenómeno de descargas parciales con tensión de corriente directa, el cual se comporta de acuerdo a la ley de Paschen.

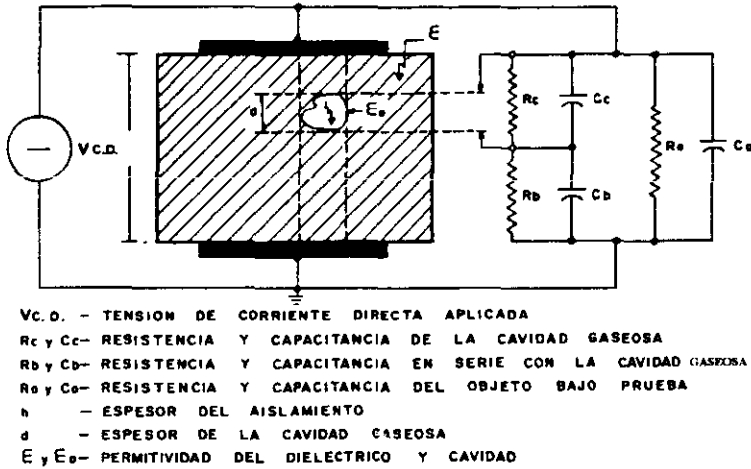


Figura A.12 Representación de una cavidad gaseosa en un dieléctrico y su diagrama eléctrico equivalente, con tensión de corriente directa.

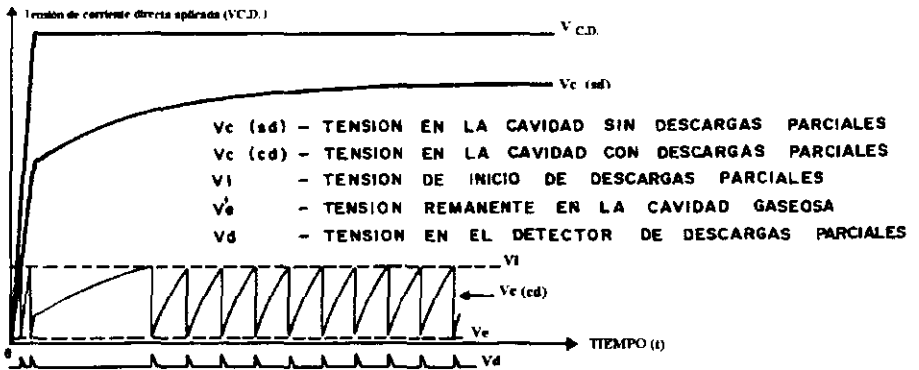


Figura A.13 Mecanismo de ocurrencia del fenómeno de descargas parciales en un dieléctrico, con tensión de corriente directa.

## **APÉNDICE B**

El tiempo  $T$ , representa el lapso que necesita el impulso para alcanzar el 90% de la tensión de pico de la curva, partiendo de 30% de la misma.

El tiempo virtual de frente  $T_1$  queda determinado por  $1.67 T$  y gráficamente es el intervalo de tiempo entre los instantes cuando el impulso esta en 30% y 90% del valor pico que corresponden a los puntos A y B de la figura B-1.

El tiempo virtual de valor medio  $T_2$ , queda determinado por el tiempo que existe entre  $0_1$  y la proyección del punto P al eje de las abscisas; el punto P, es el punto en la cola de la curva, en el que el abatimiento de la Tensión alcanza el 50% de la tensión de pico.

La onda normalizada tiene las siguientes tolerancias:

Valor de tensión de pico  $\pm 3\%$

Valor de tiempo de frente  $\pm 30\%$

Valor de tiempo medio de cola  $\pm 20\%$

Se pueden tolerar pequeñas oscilaciones en el frente de la onda de tensión de impulso cuya amplitud no exceda de 5% de la tensión de pico; en la parte inferior al 50% del valor de pico, del frente de la onda se pueden tolerar oscilaciones de amplitud no mayores al 10% de la tensión de pico. En la figura B-2 se muestran algunos ejemplos de impulsos con oscilaciones o sobredisparos.

## **GLOSARIO**

de hecho está gobernada por la inductancia y capacitancia inherente al circuito.

**Sobretensiones internas de baja frecuencia.**- Estas ocurren a la frecuencia nominal del sistema e incluyen la tensión en estado permanente que puede resultar, con pequeñas variaciones por la desconexión de una carga.

**Sobretensión (para un sistema o para un equipo).**- Es cualquier valor de tensión cresta que excede la que existe a través de las terminales del aislamiento, cuando todas las terminales de fase del equipo a la cual pertenece dicho aislamiento, están energizadas con las tensiones de fase a tierra, que corresponden a una tensión de referencia dada de la fase a fase. Para un sistema de tensión de referencia se considera como la tensión más alta del sistema, mientras para un equipo se considera como la tensión más alta del equipo.

**Sobretensión temporal.**- Es una tensión oscilatoria de más larga duración que un periodo a la frecuencia del sistema, la cual no está amortiguada o tiene un débil amortiguamiento. La severidad de las sobretensiones temporales esta principalmente caracterizada por su amplitud y duración.

**Sobretensión transitoria.**- Sobretensión de corta duración de pocos milisegundos, la cual puede ser oscilatoria, usualmente altamente amortiguada, puede estar superpuesta a una sobretensión temporal estas sobretensiones se clasifican en sobretensión de frente lento y sobretensión de frente rápido.

**Sobrevoltaje dinámico.**- Son aquellos excesos de voltaje sobre el voltaje nominal.

**Streamer.**- Repetitivas descargas por corona que se caracterizan por pequeños filamentos luminosos que se extienden dentro de un campo eléctrico de baja intensidad, cerca del electrodo negativo o positivo pero no arquean.

**Tensión de aguante estadística.**- se define así cuando el número de descargas "toleradas" está relacionado a una probabilidad de aguante. En general esa probabilidad es del 90%.

**Tensión crítica de flameo.**- Será la tensión con probabilidad 50% de flameo.

**Tensión de aguante requerida.**- Es el valor de tensión de aguante que se requiere para asegurar que el aislamiento al ser instalado en condiciones reales de servicio, cumpla con la tensión de aguante para coordinación de todo el tiempo de servicio. La tensión de aguante requerida debe considerar todos los elementos (condiciones atmosféricas normalizadas, configuración del aislamiento, número y condiciones de los objetos probados como son equipos nuevos, envejecimiento artificial, etc.), además de la tensión de la prueba de aguante normalizada, seleccionada para verificarlo.

**Tensión de inicio de descargas parciales.**- Es la tensión a la cual desaparecen las descargas parciales, cuando se disminuye gradualmente la tensión aplicada al objeto bajo prueba.

**Tensión de salto (flashover voltage).**- Descarga disruptiva sobre la superficie de un aislamiento líquido o gas.

**Tensión máxima de diseño del equipo (Vd).**- Es el valor eficaz de tensión entre fases más alto para el cual está diseñado el equipo con respecto a su aislamiento y a otras características asociadas con esta tensión, en las normas relativas al equipo.

**Tensión máxima de un sistema trifásico (Vm).**- Es el valor eficaz de la tensión de operación entre fases más alto, el cual ocurre bajo condiciones normales de operación, a cualquier tiempo y en cualquier punto del sistema.

**Tensión no disruptiva (withstand voltage).**- La probabilidad de un valor de voltaje de prueba que soporta el equipo de prueba bajo condiciones específicas.

**Tensión Nominal de un sistema trifásico (Vn).**- Es el valor eficaz de la tensión entre fases con que se designa el sistema y al que están referidas ciertas características de operación del mismo.

**Terminal aislada.**- Es cualquiera de los electrodos (conductor de fase, núcleo magnético, tanque metálico o estructura, plano de tierra, etc.) entre los cuales se aplica la tensión que esfuerza al aislamiento. En la práctica se divide en terminales de fase y de tierra. (Nota) todos los electrodos que se encuentran al mismo potencial se consideran como una terminal.

**Tiempo de frente virtual de un impulso de rayo (virtual front time of a lightning impulse  $T_1$ ).**- Intervalo de tiempo entre los instantes de 30% y 90% de un valor pico multiplicado por 1.67.

**Tiempo virtual del valor medio (virtual time to half-value  $T_2$ ).**- Intervalo de tiempo entre el origen virtual y el instante de cola cuando el voltaje decreció a la mitad del valor pico.

**TIU.**- Tiempo de Interrupción por Usuario.

**Trichel streamers (efecto corona).**- Pulsos que tienen la característica de tener pequeños pulsos de corriente y corta duración (en el rango de unos cientos de nanosegundos). Pero muy repetitivos (en el rango de kilohertz o más).

**Valor de prueba de un voltaje alterno (value of the test voltage for alternating voltage).**- Valor pico dividido entre la raíz de 2, o valor rms.

**Valor rms (root-mean-square).**- La raíz cuadrada de un valor medio de los valores de voltaje durante un ciclo completo.

**Voltaje pico de impulso (peak value of impulse voltages).**- El máximo valor de impulso dado por una onda exponencial sin sobredisparo.

## **BIBLIOGRAFÍA**