



**DIVISION DE EDUCACION CONTINUA  
FACULTAD DE INGENIERIA U.N.A.M.**

**TEMAS SELECTOS DE TRANSFORMADORES**

**CURSO DE SUPERACION ACADEMICA-DIVISION  
DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA**

**PROF. ING. ANTONIO CARDENAS LOAE**

**DEL 4 AL 8 DE OCTUBRE, 1982.**

## FERRORESONANCIA Y TRANSFORMADORES DE POTENCIAL

### I) GENERALIDADES

- A) circuito resonante serie
- B) circuito resonante paralelo
- C) circuito resonante general

### II) Posibilidades de encontrar los fenómenos

#### de ferroresonancia en las redes

- A) líneas protegidas por fusibles o interruptores
- B) líneas con transformador de potencia o bobina de Petersen
- C) líneas con transformador de potencial
  - 1) redes a neutro aislado
  - 2) transformadores de potencial
  - 3) capacitancias: líneas
    - bancos de capacitores serie
    - bancos de capacitores paralelo
    - parásitas
- D) fenómenos que pueden ocasionar ferroresonancia
- E) peligros de la ferroresonancia

### III) Influencia de los valores, características y remedios

- A) resistencia
- B) inductancia
- C) capacitancia
- D) Soluciones

### IV) Influencia de la ferroresonancia sobre el diseño de

#### los transformadores de potencial

- A) devanado antirresonante
- B) otras partes

## FERRORESONANCIA Y TRANSFORMADOR DE POTENCIAL

Los fenómenos inadecuadamente llamados "ferroresonancia", son debidos a la presencia de una resonancia serie ó paralelo en un circuito eléctrico, constituido por capacitancias e inductancias magnetizantes, estando éstas a punto de saturarse.

En primer lugar, analizaremos éste fenómeno en los circuitos serie, paralelo y compuestos.

Enseguida, veremos las posibilidades de encontrarlos en las redes eléctricas y la posibilidad de suprimirlos. Finalmente, investigaremos las influencias de la ferroresonancia sobre el diseño y la selección de los transformadores de potencial.

I-A) Estudio de la resonancia de un circuito constituido por una inductancia magnetizante a punto de saturación y una capacitancia en serie. Sencillamente éste circuito se representa como sigue (fig. I)

Si suponemos que las resistencias son despreciables, podemos obtener el diagrama U, I (fig. II), en el cual para la corriente alterna  $\overline{00}$ , hay resonancia: las tensiones en los bornes de la inductancia y de la capacitancia son iguales y opuestas y tienen un valor  $\overline{00}$ .

Para obtener éste punto de cruce, es necesario que la inductancia magnetizante, presente un codo de saturación; lo cual explica la limitación dada en la definición.

Aplicando ahora al circuito una tensión senusoidal  $U$  creciente, ésta será igual a la diferencia entre  $U_L$  y  $U_C$ . Para una tensión total  $A'A''$ , la tensión de la inductancia será  $A'A$  y de la capacitancia  $A''A'$ : la corriente estará atrasada noventa grados con respecto a la tensión. La tensión total aumentará hasta un máximo situado en  $B'B''$ . Si la tensión total continúa aumentando, deberá tomar el valor  $F''F'$ ; en efecto, después de  $B'B''$  la tensión total disminuye, se anula y aumenta hasta  $E''E'$  igual a  $B'B''$ . De donde la corriente subirá bruscamente de  $OB$  hasta  $OF$  y se adelantará a la tensión. Las corrientes entre  $OB$  y  $OE$  no pueden ser alcanzadas, las incluidas entre  $OD$  y  $OE$  pueden ser obtenidas al momento del regreso del punto  $F$ .

En resumen, tenemos el diagrama siguiente: (fig. III)

El brusco aumento de la corriente puede generar sobretensiones importantes.

Es importante notar que éste fenómeno se produce para cualquier frecuencia.

Si ahora identificamos la inductancia saturable por un transformador de potencial, debemos tener en cuenta sus resistencias; éstas son muy pequeñas, pero existen.

Si dibujamos la variación del módulo de la tensión en función de la corriente, obtendremos una curva similar a la de la (fig. IV)

En  $A$ , no hay anulación de la tensión debido a la componente wateada del transformador de potencial.

En efecto, en el cuadripolo del transformador de potencial (fig. V), la corriente de excitación  $I_0$  se divide en dos componentes:  $I_w$  o corriente wateada en fase con la tensión

$I_m$  o corriente magnetizante defasada noventa grados de la tensión

La componente  $I_w$  a través de  $R_w$  que representa las pérdidas wateadas en el núcleo crea una tensión que llamaremos  $U_{Iw}$ .

Si aplicamos una cierta tensión  $U_I$ , podemos observar varias posibilidades de régimen de trabajo (fig. VI). En primer lugar un régimen representado por el punto  $a$  que será el régimen normal; enseguida, en  $b$ , un régimen inestable que tenderá hacia  $a$  ó hacia  $c$ . Finalmente, un régimen estable en ferresonancia representado por  $c$ . El valor  $U_{Iw}$  es muy pequeño porque es una de las componentes que introduce errores en el transformador de potencial y se trata en el diseño de los transformadores de potencial de que sea lo más pequeño posible.

I-B) Estudio de la resonancia de un circuito constituido por una inductancia magnetizante a punto de saturación y una capacitancia en paralelo.

Los fenómenos son recíprocos de los precedentes.

El diagrama U,I será el siguiente (fig. VII).

La corriente total I será la diferencia entre  $I_1$  e  $I_0$ . Cuando la corriente crece, la tensión sube hasta  $OU$  y después salta bruscamente hasta  $OF$ , durante lo cual, la corriente se invierte.

Tendremos el diagrama resumen de la (fig. VIII).

Los fenómenos estudiados en el circuito serie, se repiten en el caso del circuito paralelo a condición de invertir los valores de corriente y tensión. La curva del módulo de la corriente contra la tensión, será similar a la de la (fig. IX).

Si aplicamos una cierta corriente  $I_x$ , obtenemos también tres posibilidades de régimen de trabajo, un régimen normal a, un régimen inestable b, que tendrá - hacia "a" ó hacia "c" y un régimen estable en resonancia en "c" (fig. X).

**I-0) Caso general**

Podemos encontrar también el caso general que consiste en la asociación de una capacitancia en paralelo con una inductancia saturable, los cuáles están en serie a su vez con otra capacitancia. (fig. XI).

Para ciertos valores de  $C_1$  y  $C_2$ , es posible obtener un "balanceo" en cadena, es decir por ejemplo, que la resonancia empezará con el circuito serie  $C_1L$ , lo - -

cuál provocará la resonancia del circuito paralelo  $L C_2$  y así sucesivamente.

A éste momento, la frecuencia no será la de la red, sino la debida a los elementos constitutivos de la red.

**II) Posibilidades de encontrar los fenómenos de ferro-resonancia en las redes.**

En primer lugar, es importante señalar que éstos fenómenos solo ocurren en sistemas con neutro aislado. Es posible observar fenómenos de ferroresonancia en muchos casos, pero particularmente en los tres siguientes:

**II-A) - líneas protegidas por fusibles o interruptores monopolares.**

En efecto, en caso de funcionamiento del dispositivo de protección de una o dos fases, obtendremos el esquema siguiente (fig. XII), En el cuál, la corriente  $I_B$  de la fase no abierta, circula según las flechas. El circuito atravesado, es un circuito resonante serie-capacitancias parásitas e inductancias del transformador de potencia.

**II-B) - líneas en las cuáles las inductancias son las de los transformadores de potencia o de una bobina de Petersen y las capacitancias las de bancos de capacitores o parásitas.**

**II-C) - líneas que incluyen transformadores de precisión -**

(medición o protección).

Basándonos sobre lo visto anteriormente para que un sistema de resistencias, capacitancias e inductancias saturables, entren en resonancia, es necesario que para un cierto valor de tensión ó corriente, se produzca un cambio en el sentido de la corriente y un cambio importante de magnitud de la corriente o de la tensión. Esto ocurre cuando las características de las capacitancias e inductancias saturables se cruzan.

Trataremos particularmente éste punto.

#### II-C1) Redes con neutro aislado

El circuito será del tipo de neutro aislado; es decir, que el neutro de los transformadores de potencia no está conectado directamente a tierra.

Pero el neutro de los transformadores de potencial, de los apartarreyos y de los electrodos de guarda, están conectados a tierra.

De toda manera, el neutro de los transformadores de potencia será conectado capacitivamente a tierra: ésta capacidad es de impedancia elevada.

Sobre éstas redes, las fallas monofásicas producirán corrientes de pequeña intensidad y que generalmente pueden apagarse espontáneamente.

Sobre éstas redes, los esfuerzos térmicos y dinámicos son muy débiles.

Pero éste modo de construcción de redes permite sobre tensiones entre las fases entre y la tierra y aparición

de fenómenos transitorios.

#### II-C2) Transformadores de potencial.

Normalmente los transformadores de potencial son conectados entre fase y tierra. Este tipo de aparato tendrá su punto neutro (el punto terminal del devanado de alta tensión), conectado directamente a tierra.

Esto es particularmente importante para permitir una buena repartición de las ondas de sobretensiones en los devanados.

En efecto, las reparticiones tienen la forma siguiente en cada caso: (fig. XIII).

$e_X$  : tensión a tierra del punto X.

$C_g$  : capacidad entre devanado y tierra

$K_g$  : capacidad interna entre los puntos considerados.

$E$  : tensión entre fase y tierra

$$e_X = \frac{\cos h \alpha x}{\cos h \alpha} E \quad e_X = \frac{\sin h \alpha x}{\sin h \alpha} E$$

$$\alpha = \sqrt{C_g / K_g}$$

$\alpha = 0$  - repartición final

En achurado, se muestra la zona de posible oscilación, la cuál es mucho más chica para el neutro conectado a tierra.

II-03) Capacitancias

Las capacitancias pueden ser agrupadas en cuatro familias:

- capacitancia propia de las líneas.  
En primera aproximación, se podrá despreciar las capacitancias para las líneas aéreas de media ó baja tensión. Para los cables subterráneos, las capacitancias son importantes. En el caso de cable monopolar, la capacitancia puede variar entre 0.20-0.50  $\mu F/Km$ ; en el caso de cable tripolar, entre 0.15 y 0.45  $\mu F/km$ .

- bancos de capacitores en serie  
Se utilizan bancos de capacitores en serie cuando se quiere reducir la impedancia de la línea, lo cual permite aumentar la potencia realmente transportable.

La utilización de bancos en serie será efectiva si la resistencia de la línea es pequeña. Además la utilización de bancos de capacitores en serie aumenta la estabilidad estática por disminución del ángulo entre las tensiones. (fig. XIV).

Los índices valen cuando no hay bancos de capacitores.

- bancos de capacitores en paralelo  
Se utiliza éste modo de conexión para mejorar el

factor de potencia, para disminuir la potencia a transportar por la línea y la potencia a producir por los generadores (fig. XV).

Los símbolos tienen el mismo significado que en el caso precedente.

- capacitancias parásitas  
Estas capacitancias son las que existen entre fase y tierra, entre el neutro y la tierra y entre los contactos de un interruptor o de un fusible abierto.

II-D) Fenómenos que pueden provocar la ferresonancia.

Como lo hemos visto, las condiciones necesarias para pasar del régimen normal al régimen en ferresonancia, son las siguientes:

- sobretensiones importantes
- sobrecorrientes importantes
- aparición de frecuencias distintas a la normal

Como lo hemos visto, es posible observar sobretensiones sobre las fases sanas cuando la otra fase se pone a tierra, cuando hay circulación de una onda de impulso de amplitud media, pero de gran duración (al momento de la abertura de un interruptor.)

Se notará sobrecorriente principalmente el "inrush" debido a la alimentación de un transformador de potencia poco cargado.

Es importante recordar que la corriente de excitación de un transformador no es senusoidal, sino que está cargada de armónicas. Es importante que la corriente completa es decir, con todas sus armónicas, excite al transformador para obtener una tensión senusoidal. En nuestro caso, como las corrientes armónicas no pueden circular fácilmente (con el neutro de los transformadores de potencia aislado), aparecerá un cierto porcentaje de armónicas en la tensión.

El diagrama de la (fig. XVI) indica los porcentajes de armónicas en la corriente de excitación para un núcleo el acero al silicio de grano orientado: 96% Fe, 3.3% Si, 0.7% C + impurezas.

Finalmente, la aparición de frecuencias distintas de la fundamental, provienen de la corriente de excitación de los transformadores, de la saturación de los núcleos de los transformadores de corriente cuando éstos tienen el secundario abierto y de las maniobras de líneas (apertura de un interruptor).

Todos éstos fenómenos saturan los núcleos de los transformadores de potencial y permiten el "balanceo" de la corriente.

II-E) Peligros de la ferresonancia para los transformadores de potencial.

Los peligros aparecen directamente de lo visto anteriormente; en efecto, todos los fenómenos de ferresonancia debidos a sobretensiones, sobrecorrientes ó cambios de frecuencia, generan sobretensiones mayores, sobrecorrientes mayores ó cambios de frecuencia. Las sobretensiones destruyen el aislamiento entre primario y secundario del transformador de potencial y aumentan la inducción del núcleo, lo cuál ocasiona un aumento de la temperatura y un aumento de la saturación del núcleo. Una vez el núcleo saturado, presenta una pequeña impedancia y podemos observar que por el transformador de potencial circulará una corriente importante.

Las sobrecorrientes aumentan la temperatura de los devanados y pueden desplazar a las espiras de su lugar. La aparición de frecuencias inferiores a la nominal, aumentan la inducción del núcleo; lo cuál tiene las mismas consecuencias que las sobretensiones. La acción conjugada ó separada de éstos tres elementos, envejece los aislamientos y puede aún quemar las bobinas.

Finalmente, todas éstas sobretensiones, sobrecorrientes y cambios de frecuencias, afectan a todos los aparatos conectados a la línea.

III) Influencia de los valores, características y soluciones.

Con objeto de poder suprimir los riesgos sobre los transformadores de potencial y los otros aparatos de las redes eléctricas debido a la ferresonancia, es indispensable conocer las influencias de cada elemento constitutivo de la red, es decir, cuál será la influencia de las resistencias, inductancias y capacitancias. Conociendo éstas influencias, será muy fácil determinar las mejores soluciones para evitar la ferresonancia.

Estudiaremos la influencia de cada elemento en el caso del circuito serie (para el circuito paralelo, obtendremos resultados similares).

#### III-A) Resistencia

Si sobre un diagrama modulo de la tensión contra corriente hacemos variar la resistencia, podemos ver que a un aumento de la resistencia hay un aumento de la tensión debida a la corriente wattada (fig. XVIIa). Aumentando la resistencia, será posible que para una tensión  $U_x$ , no sea posible alcanzar un régimen de ferresonancia.

#### III-B) Inductancia

Si sobre un diagrama  $U, I$  normal, hacemos variar la inductancia, se disminuirá o aumentará la posibilidad de cruce (fig. XVII b).

#### III-C) Capacitancia

Si sobre el mismo diagrama, hacemos variar la capacitancia, podemos ver que se aumentará ó disminuirá la posibilidad de cruce (fig. XVII c).

#### III-D) Soluciones

De todo lo anterior, se puede ver que hay varias posibilidades de impedir un funcionamiento en ferresonancia.

- Un medio muy sencillo es conectar una resistencia de algunos ohms en las terminales de la delta abierta formada por los terciarios de los transformadores de potencial (fig. XVIII).

En servicio normal la tensión entre a y b será cero; en servicio anormal la tensión será igual a la compuesta y através de la resistencia, hará circulación de una corriente wattada importante (fig. XIX).

- Otra solución será conectar una inductancia casi saturada, en el mismo tipo de conexión.

En servicio anormal, la inductancia se satura y presenta una impedancia despreciable, lo cual causa una corriente importante que tendrá como efecto, terminar con el fenómeno de ferresonancia.

- Una solución será poner un medio sensible a los cambios de frecuencias: alimentando una resistencia através de un relevador de frecuencia ó de un filtro "tapón" a la frecuencia nominal (fig. IX).



Otra solución consistirá en conectar el neutro de la red a tierra a través de un transformador de gran impedancia. Al momento del desequilibrio, la tensión que aparece en el secundario de este transformador alimenta un relevador, el cual actúa sobre un interruptor que pone directamente a tierra el neutro (fig. XII).

También se puede obtener una solución modificando los valores de inductancias o capacitancias para no obtener cruce.

Una última solución será conectar una bobina en zig-zag a los secundarios de los transformadores de potencial que no tienen terciario. Los dos puntos neutros son conectados a una resistencia ó a una inductancia casi saturada (fig. XIII). Cualquiera que sea la solución elegida, es siempre interesante probar sobre un microcircuito, las condiciones de ferresonancia y la efectividad de la solución adoptada.

Conectando un voltmetro, un oscilógrafo ó mejor un osciloperturbógrafo entre el neutro de un autotransformador elevador y la tierra, se alcanzan a obtener resultados muy claros. Me permito adjuntar el esquema que nos ha dado mucha facilidad para pruebas (fig. XIV).

...#...

Las capacidades son las que se han medido sobre la red.

IV) Influencia de la ferresonancia sobre el diseño de los transformadores de potencial.

Aún conociendo todas las soluciones posibles, es necesario que el diseñador de transformadores de potencial diseñe y fabrique sus aparatos, también en función de la ferresonancia.

Su atención se aplicará en primer lugar en el diseño del devanado.

IV-A) Devanado

En efecto, se puede realizar el devanado de la parte de alta tensión de varias maneras:

1) por galleta de pocas espiras, cada galleta aislada.

2) por capas largas aisladas entre ellas (fig. XV)

Estos dos esquemas se pueden representar como sigue (fig. XVI).

En el caso del devanado en galletas cortas, las capacitancias importantes, son las que aparecen entre galletas y tierra; en el caso del devanado en capas largas, las importantes son las que aparecen entre capas.

Se puede ver que el devanado en capas largas será mucho más favorable para permitir una repartición idén

...#...

tica de la tensión en servicio normal (rama inductiva) y en servicio anormal (rama capacitiva).

Por ésta razón en los transformadores de potencial bien estudiados, se utilizará el tipo de devanado en capas largas.

Este tipo puede presentar resonancia en el seno del devanado. Llamaremos antiresonante un devanado en el cual la repartición de la tensión en servicio normal, coincida con la repartición de la tensión en régimen transitorio.

Para llenar ésta condición es necesario dar a cada capa una capacitancia tal que la tensión que aparece al momento de un régimen transitorio sea proporcional al número de espiras que contiene la capa.

Como el devanado está generalmente realizado con un solo calibre de alambre, el número de espiras será directamente proporcional a la longitud de la capa y la tensión será directamente proporcional al número de espiras.

$$\frac{1}{C_{\text{capa}}} = k_1$$

- l = largo de una capa
- k', k = constante
- e = espesor del dieléctrico
- r = radio de la capa

La capacitancia será también igual a:

$$\frac{1}{C_{\text{capa}}} = k' \frac{e}{B} = k' \frac{e}{lr}$$

De donde la condición será:

$$k_1 = \frac{k'e}{lr} \quad \delta \quad \frac{l^2 r}{e} = \text{constante}$$

Esta es la única condición a respetar.

De ésta fórmula, podemos hacer del devanado según una de éstas cuatro formas para obtener la antiresonancia.

A)  $1 = \text{constante}$  de donde,  $e = \frac{k}{r}$

el espesor del aislamiento será inversamente proporcional al radio de la capa.

B)  $e = \text{constante}$  de donde,  $l^2 r = \text{constante}$

el espesor del aislamiento es constante, la longitud de las capas variará como la raíz cuadrada del inverso del radio de la capa.

C)  $\frac{1}{e} = \text{constante}$  de donde,  $lr = \text{constante}$

el gradiente del aislamiento será constante. La longitud de las capas variará como el inverso del radio.

D)  $\frac{l^2 r}{e} = \text{constante}$

el espesor del aislamiento variará como el producto del radio por el cuadrado de la longitud de la capa.

#### IV-B) Otras Partes

Después de haber estudiado un devanado antiresonante, el diseñador deberá controlar que la inducción de trabajo permita para los transformadores de potencial conectados a una red a neutro aislado, un funcionamiento

de larga duración a la tensión compuesta y si es posible, a tensiones superiores a la compuesta.

La realización del devanado deberá asegurar una construcción rígida impidiendo cualquier movimiento a las espiras, asegurando un enfriamiento rápido y una construcción incombustible.

Todas estas conclusiones se obtienen fácilmente en los transformadores encapsulados pero presentan algunas dificultades para los devanados aislados en aceite.

Para el utilizador, además de una buena conexión del neutro del transformador de potencial a tierra la cual permite una circulación de las armónicas de la corriente de excitación, es importante utilizar transformador de potencial de potencia adecuada es decir, que la suma de los voltamperes de las cargas, deberá ser vecina de la potencia nominal de precisión del transformador.

En efecto, un transformador de potencial de gran potencia de precisión, deberá tener un núcleo importante lo cual significa una corriente magnetizante grande, sus devanados deben ser hechos con cobre de sección importante, lo cual implica un mayor espesor de los devanados, es decir, aumenta la inductancia de manera importante y al mismo tiempo que se obtiene una resistencia pequeña.

Si en éste caso la componente wateada de la corriente de la carga es muy pequeña, la importancia relativa de la compo-

nente magnetizante de la corriente de excitación será mucho más grande que la de la corriente wateada debida a la componente de excitación y de la carga.

Como ésta observación se relaciona tanto a los riesgos de ferrosresonancia sobre la red, como dentro de los devanados del transformador, es de suma importancia ajustar las potencias de los transformadores de precisión a las potencias de las cargas previstas.

31 de julio de 1967,

FIGURA I

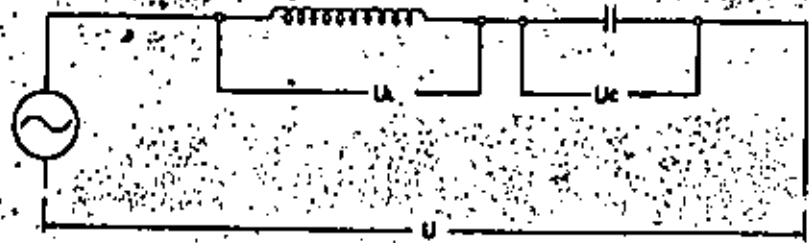


FIGURA II

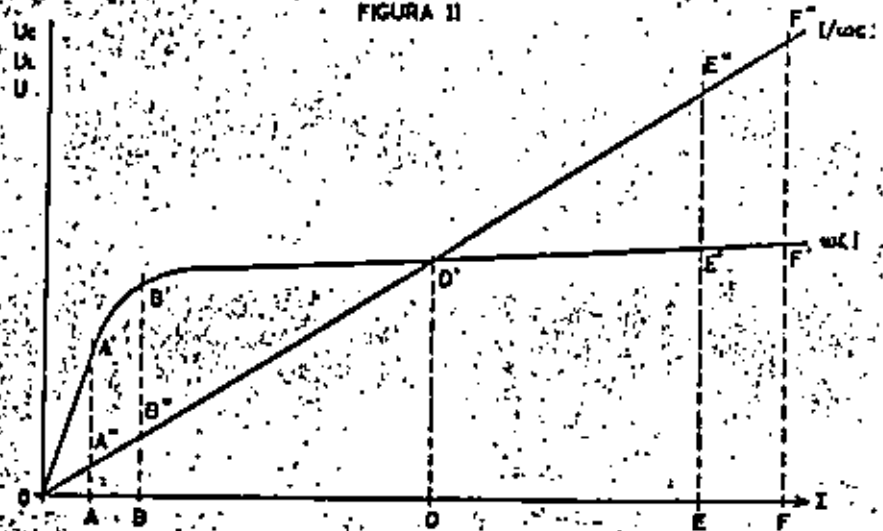


FIGURA III

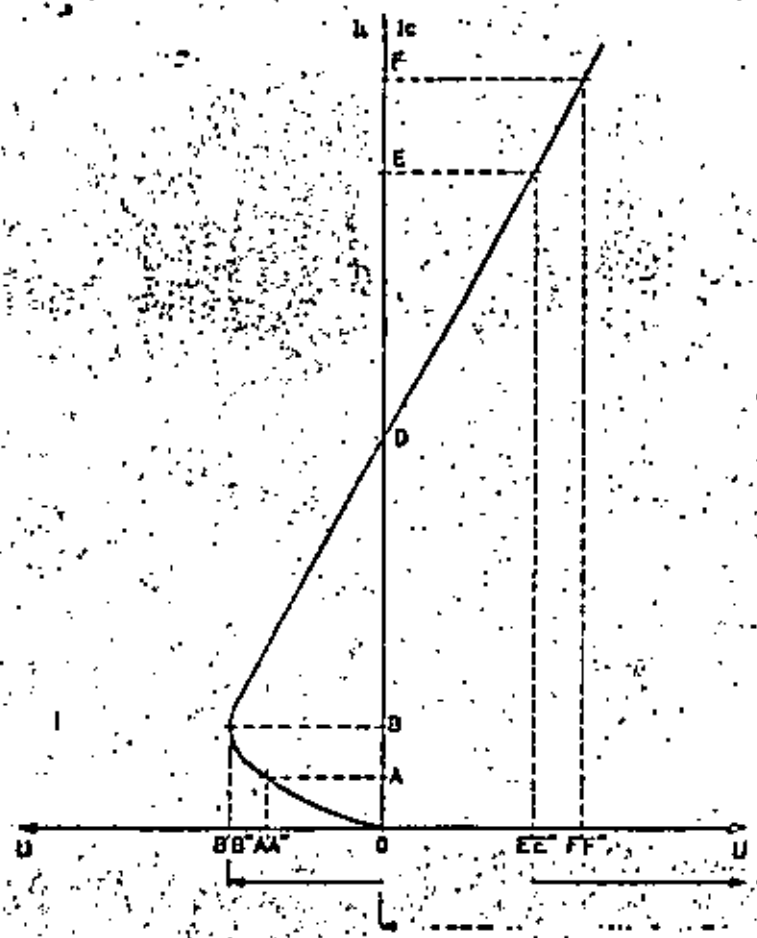


FIGURA IV

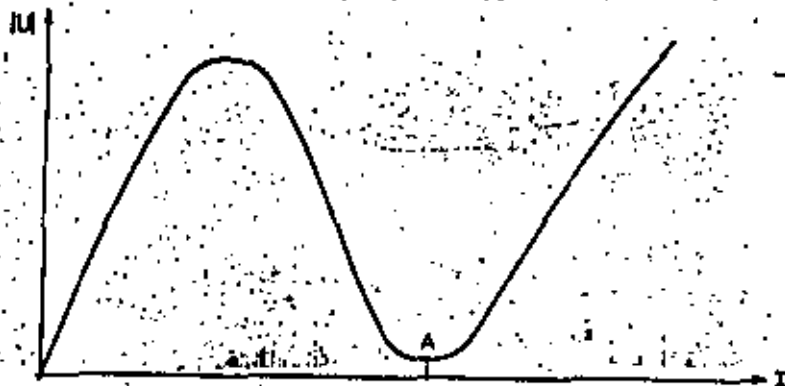


FIGURA VI

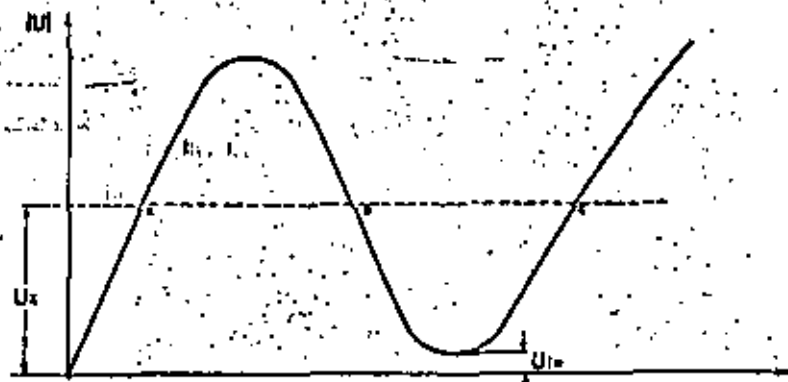


FIGURA V

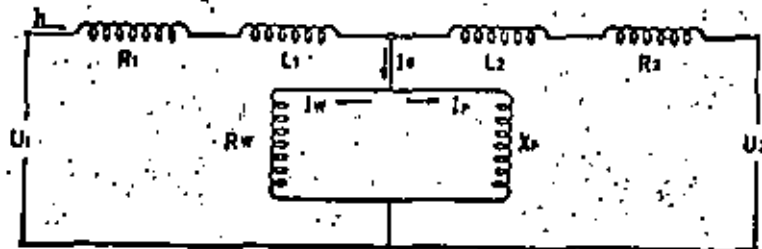


FIGURA VII

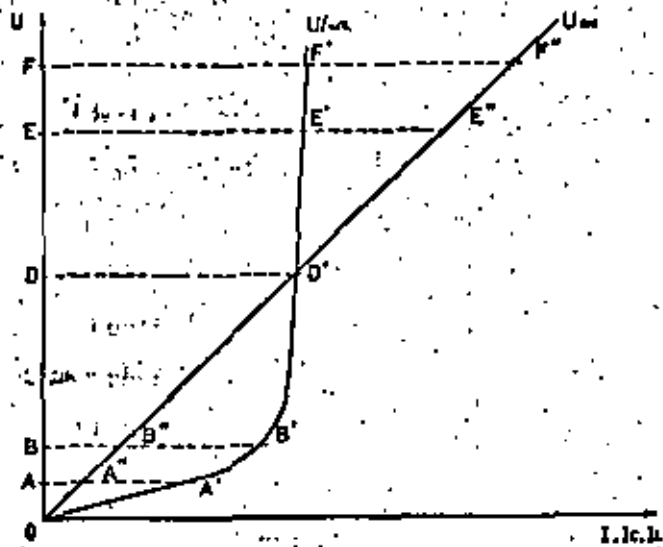


FIGURA VIII

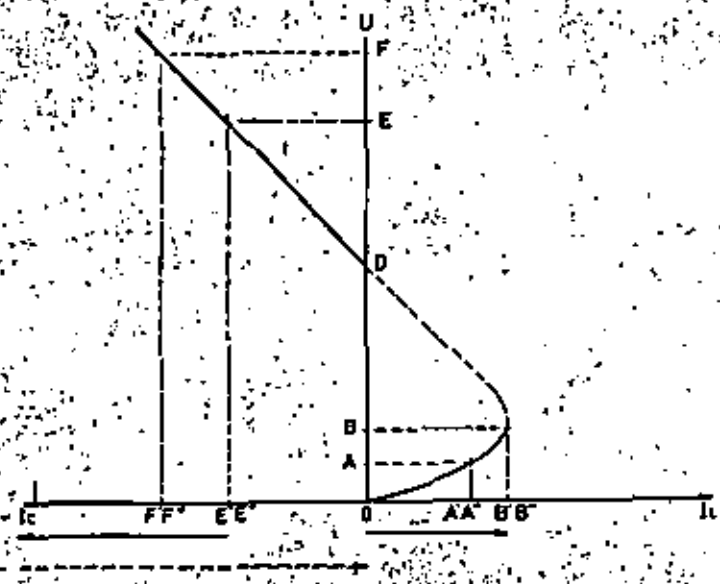


FIGURA X

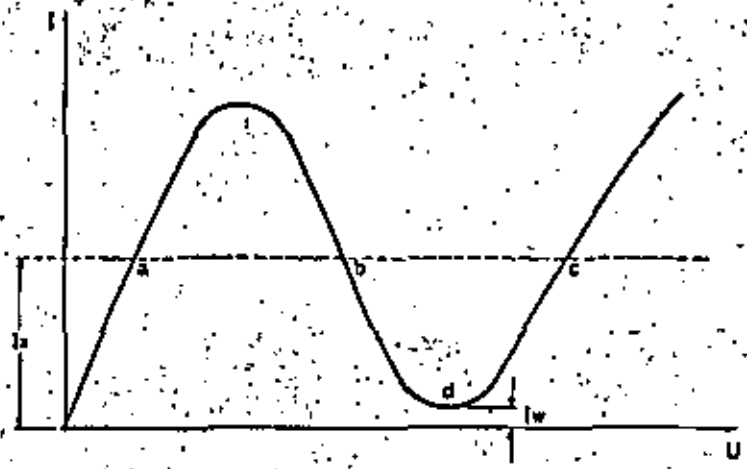


FIGURA IX

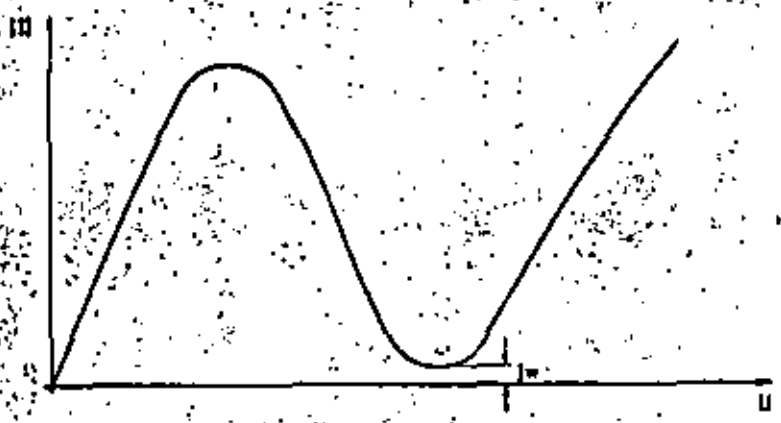


FIGURA XI

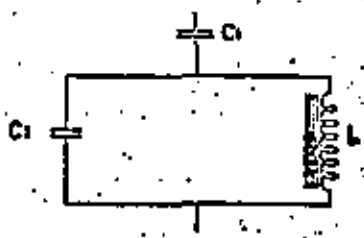


FIGURA XII

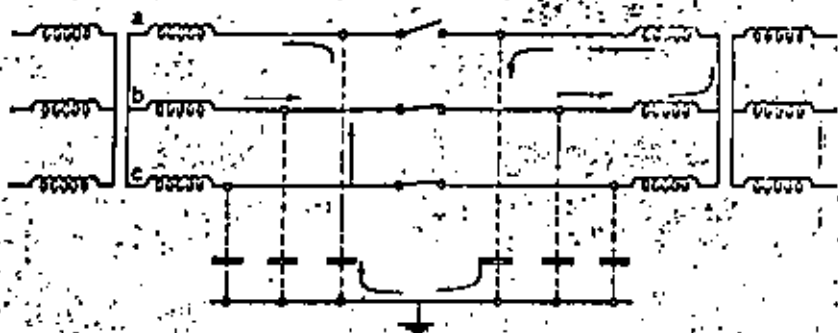


FIGURA XIII-b

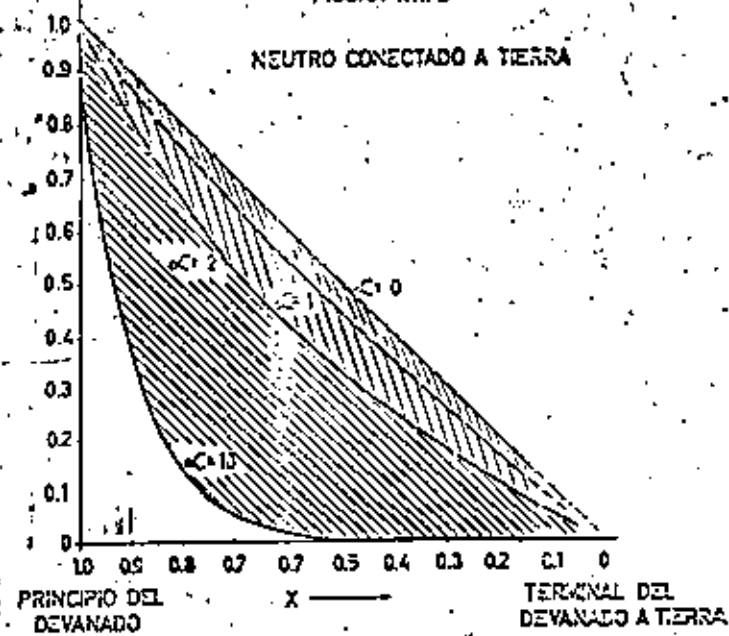


FIGURA XIII-a  
NEUTRO AISLADO

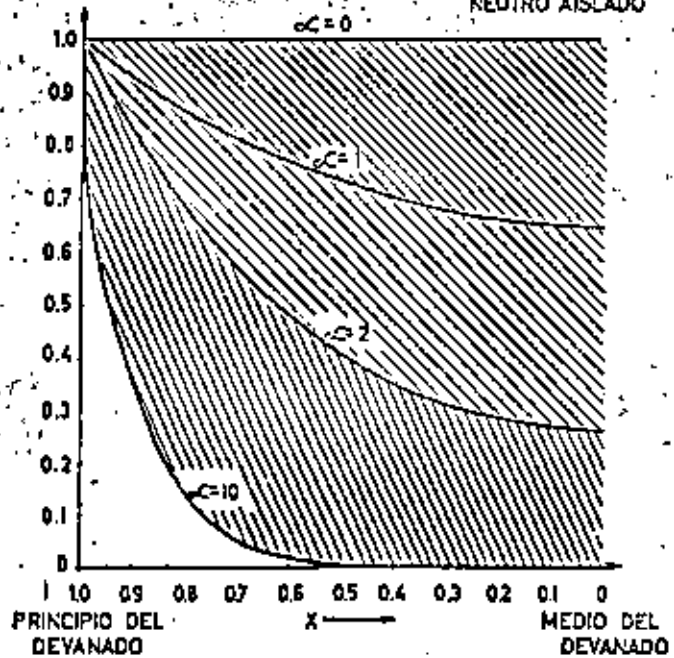
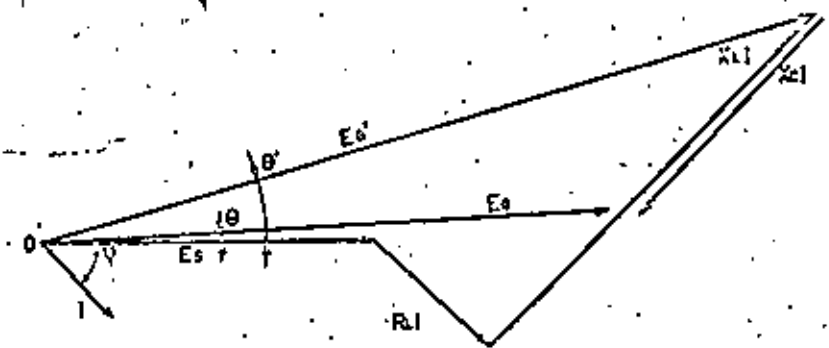


FIGURA XIV



E = tensión G = generador L = línea L = reactivo  
 I = corriente S = receptor a = activo c = capacitivo  
 X = reactancia R = resistencia  $\theta, \theta'$  ángulo entre tensiones  
 cos  $\phi$  = factor de potencia

FIGURA XVa

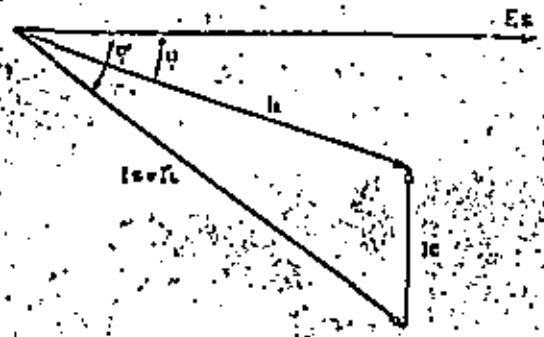


FIGURA XVb

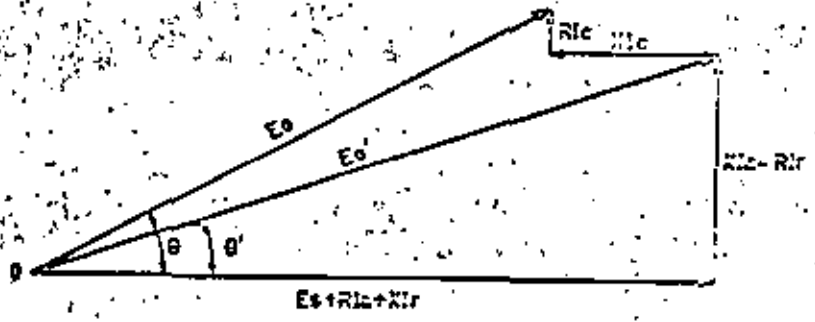


FIGURA XVI

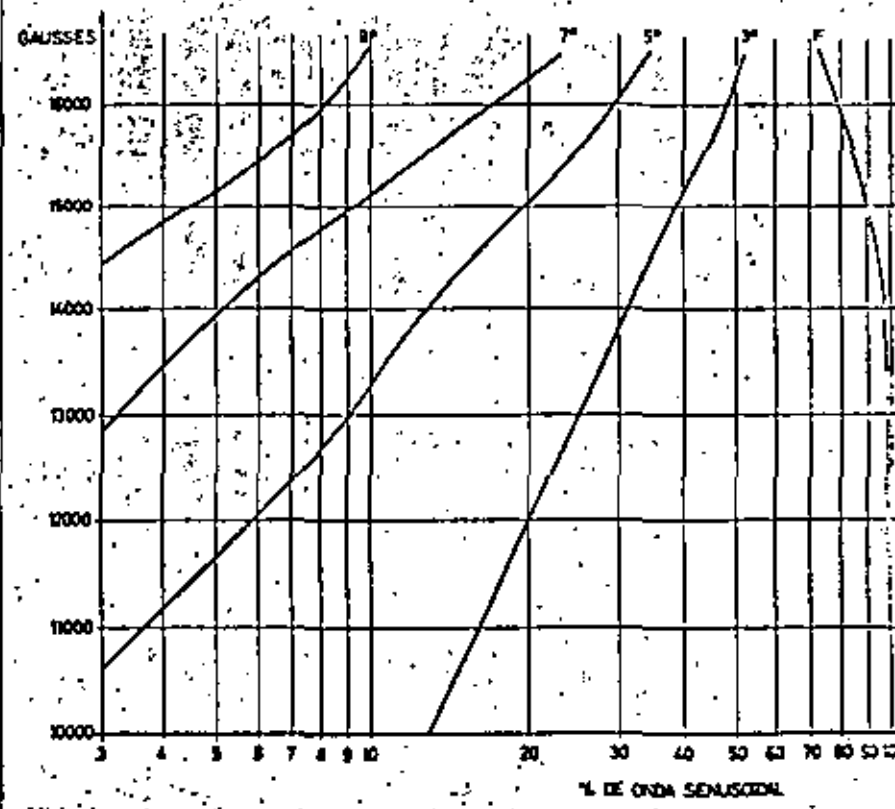




FIGURA XVII-a

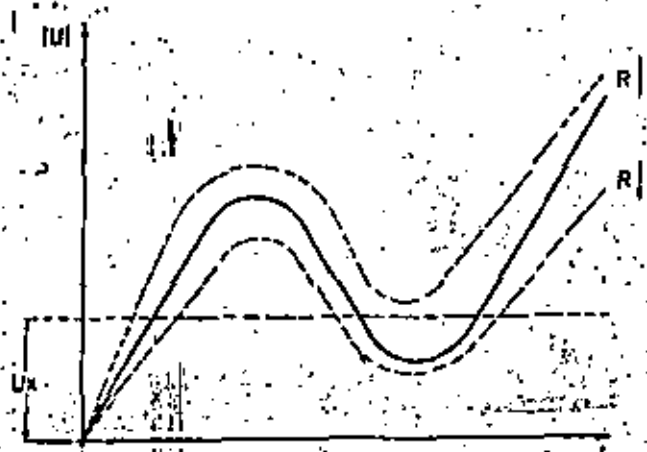


FIGURA XVII-c



FIGURA XVII-b

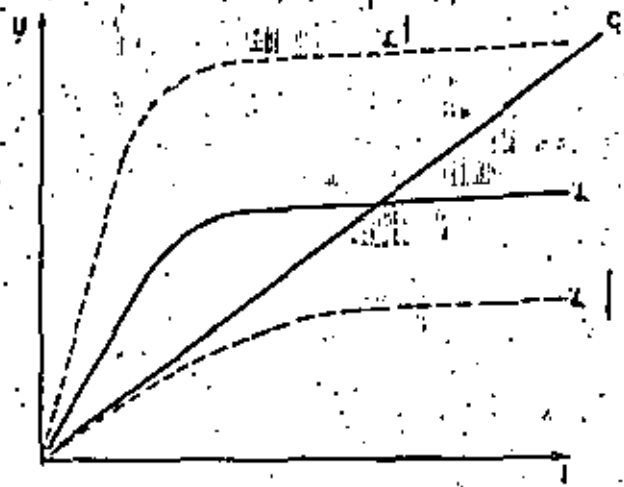


FIGURA XVIII

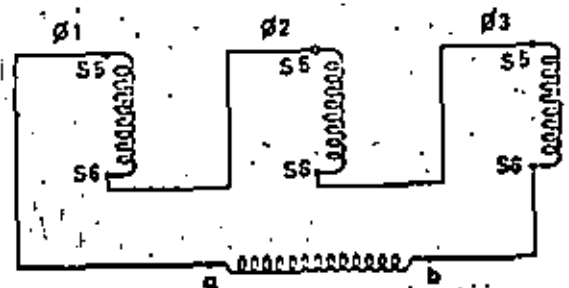


FIGURA XIX

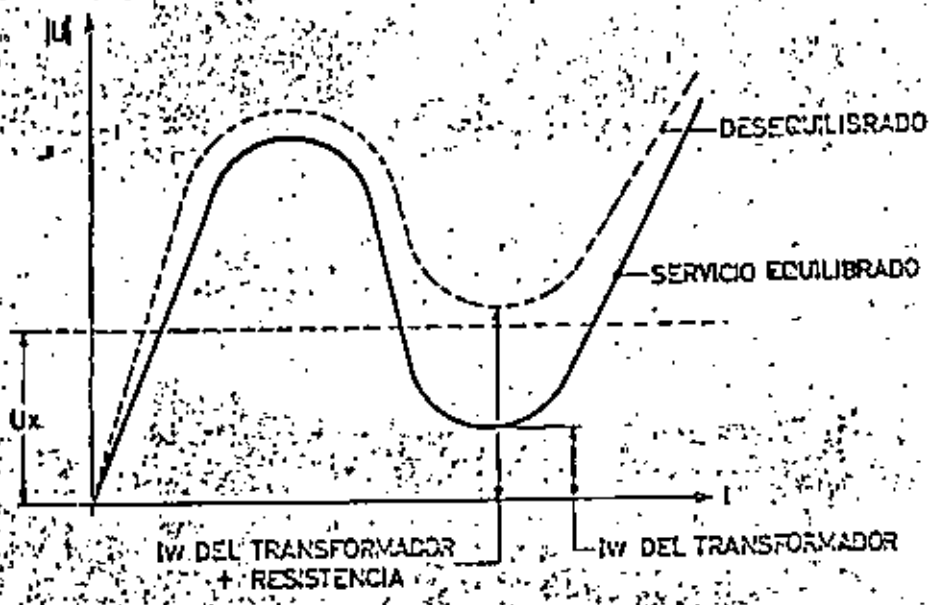


FIGURA XXI

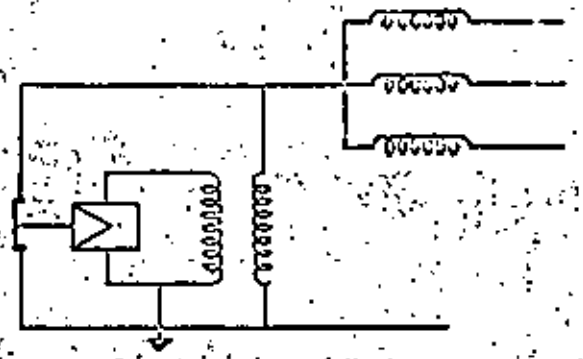


FIGURA XX

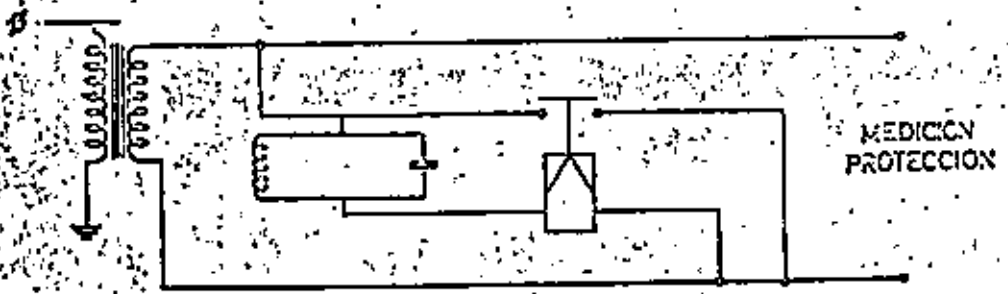


FIGURA XXII

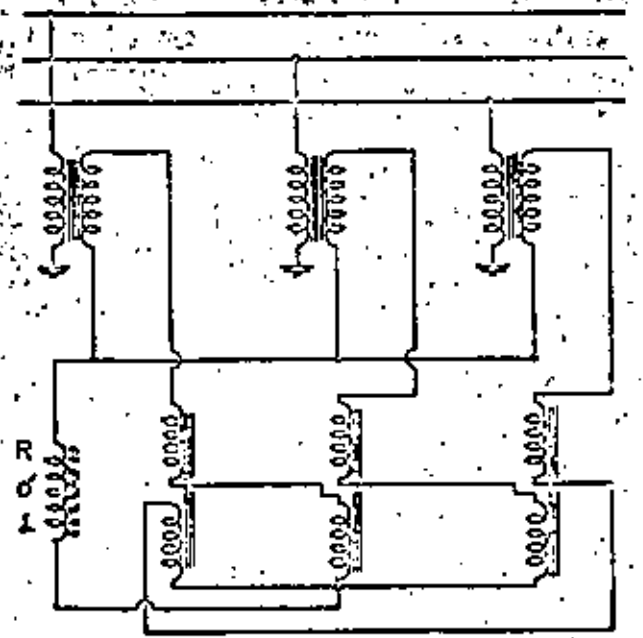


FIGURA XXIII

(27)

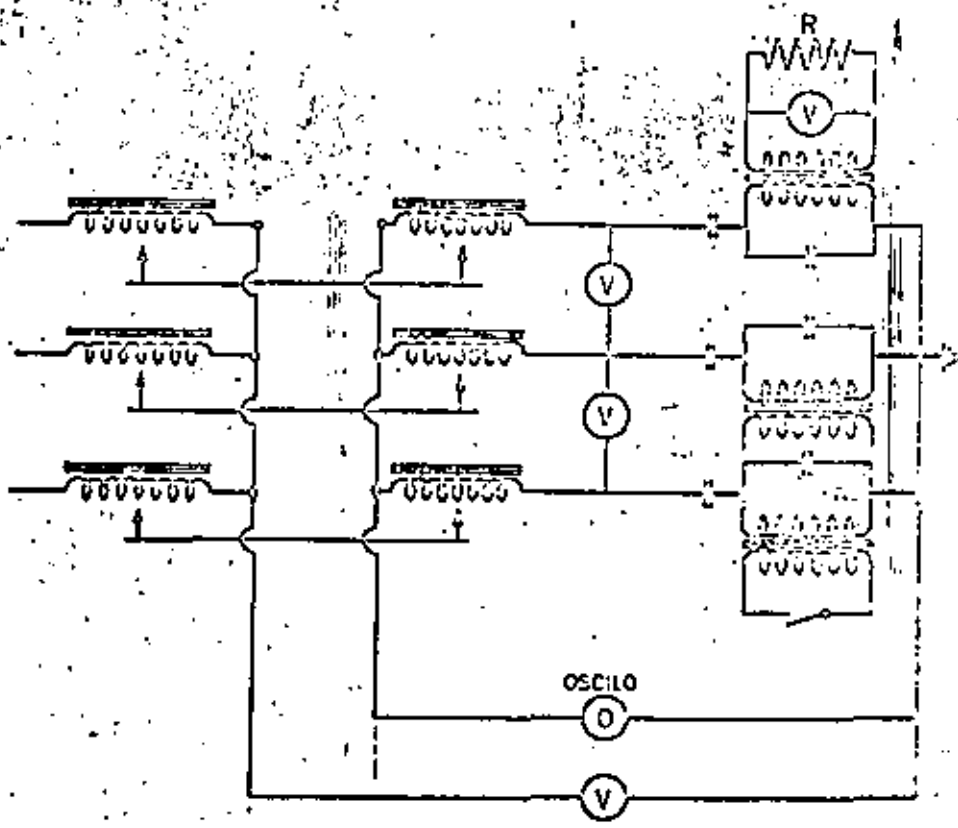


FIGURA XXIV

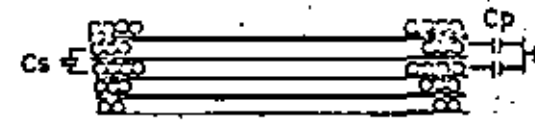
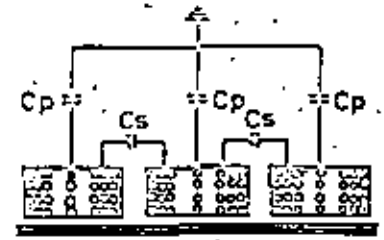


FIGURA XXV

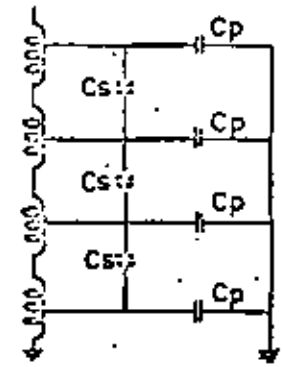
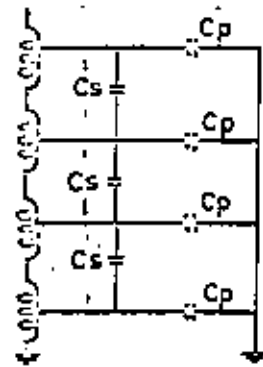


FIGURA XXIV

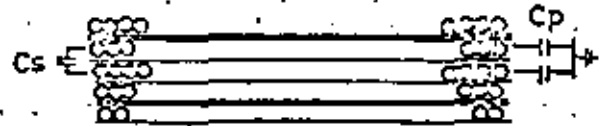
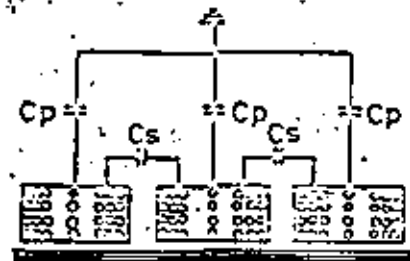
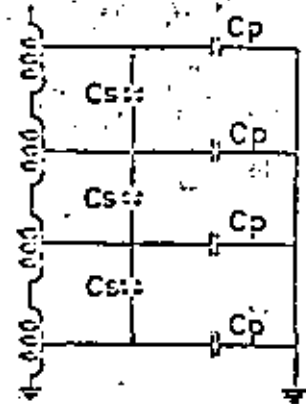
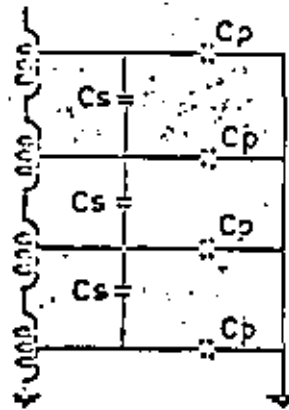


FIGURA XXV



# La importancia de las descargas parciales en equipo de alta tensión

Ing. Antonio Cárdenas  
Electrotécnica Balteau, S.A. de C.V.

## 1. INTRODUCCION

Aunque ya hace medio siglo que se conocen a las descargas parciales como causa de deterioro de los materiales aislantes, este fenómeno había recibido poca atención porque entonces el deterioro era muy lento, debido a que los materiales aislantes trabajaban a esfuerzos dieléctricos bastante débiles y el diseño y la concepción de los aparatos eran tales que, muy raramente, había posibilidad de encontrar estas descargas en algún lugar realmente de peligro. Además, en el caso que las descargas fueran peligrosas efectivamente, éstas aparecían con una magnitud tan fuerte que se podían detectar con facilidad por los medios clásicos, bien por el oído, o bien por la medida de las pérdidas (fig. 8).

Un poco antes de la Segunda Guerra Mundial, aparecieron métodos más avanzados de detección, principalmente debido a "las perturbaciones radiofónicas" producidas por los effluvios, descargas e ionizaciones diversas; ellas dieron lugar a las recomendaciones publicadas en 1940, en los Estados Unidos, por un comité de coordinación con representantes del Edison Electric Institute (E.E.I.), la National Electrical Manufacturers Association (NEMA) y la Radio Manufacturers Association (RMA).

La aparición de los aislantes en materias coladas o extrudidas, en particular de los plásticos (después de la guerra), creó problemas de homogeneidad, tales como la posible existencia de pequeñas cavidades en el aislamiento. Estas cavidades no dan lugar a pérdidas apreciables y fácilmente medibles, pero son, sin embargo, una causa de grave debilitamiento del aislamiento. Sólo un método de medición que esté bien adaptado permite la detección de estas pequeñas cavidades y ha dado lugar al estudio y al desarrollo de los diversos aparatos utilizados actualmente.

Estos métodos de medida, perfeccionados, permiten el control de las cualidades del tratamiento a que son sometidos los aislantes tradicionales (papel impregnado), y se utilizan en la actualidad para poder emplear al máximo las posibilidades dieléctricas del material; esto es, a aumentar la calidad del conjunto y contribuir al aumento de potencia útil por unidad de volumen en todo el equipo eléctrico de alta tensión, como son los transformadores, capacitores, cables, etc.

Actualmente, los métodos se encuentran desarrollados ampliamente, pero no se ha logrado establecer ningún criterio uniforme para fijar los medios de medida y las magnitudes límites.

## 2. DEFINICION Y CLASIFICACION

*Una descarga parcial es una descarga eléctrica que no pone en corto circuito dos electrodos bajo tensión.*

Las descargas parciales pertenecen al grupo de descargas en gas, las cuales, a su vez, son una forma de ionización.

El término ionización es usado con frecuencia en lugar de descargas parciales o internas. Esto es incorrecto, ya que el campo de este término es, según su definición, más amplio. *Ionización* es un proceso por el cual un átomo llega a cargarse eléctricamente debido a la pérdida o ganancia de uno o más de sus electrones.

*En una descarga en gas*, las moléculas gaseosas son ionizadas por impacto de electrones. Los electrones formados ganan velocidad en un campo eléctrico, ionizan más moléculas por impacto, de tal manera que se produce un alud de electrones. Este alud de electrones y los iones producidos, se desplazan hacia los electrodos, formando por consiguiente un camino de corriente a través del gas.

Las descargas parciales se pueden clasificar en:

- a) Descargas internas, que aparecen dentro de una cavidad gaseosa, en el seno de un sólido o líquido, fig. No. 1.

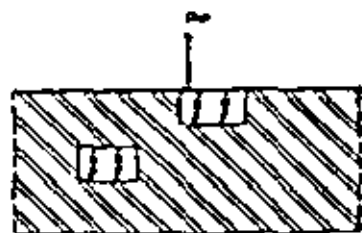


FIGURA 1

- b) Descargas superficiales, que aparecen a la superficie de un dieléctrico, fig. No. 2.

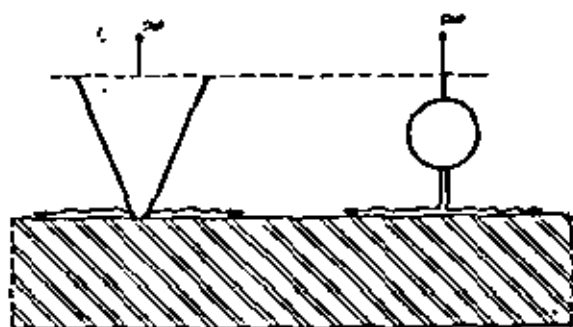


FIGURA 2

- c) Descargas por efecto corona, que aparecen alrededor de un punto o arista de un electrodo en el seno de un fuerte campo eléctrico no uniforme, fig. No. 3.



FIGURA 3

Por lo visto, también es un error hablar de efecto corona cuando se trata de descargas parciales, ya que las descargas de corona son un tipo específico de descargas parciales.

En el estudio se distinguirán:

- Las descargas parciales internas, que aparecen en el seno del dieléctrico y que, en un aparato correctamente diseñado para estar normalmente exento de descargas, relevan una occlusión nociva;
- Las descargas parciales externas, no nocivas para la vida del aparato porque ionizan el aire exterior. En este caso, hay todavía que distinguir entre las descargas puramente externas, fácilmente reconocibles por medio de un oscilógrafo, y las descargas en la superficie que son difíciles de diferenciar de las descargas internas.

### 3. PROCESO FÍSICO DE UNA DESCARGA INTERNA

El proceso físico de una descarga interna en corriente alterna, puede ser descrito convenientemente con un circuito análogo, fig. No. 4.

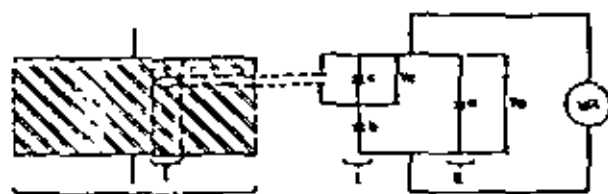


FIGURA 4

Consideremos el caso ideal en el cual exista una sola cavidad en el seno del dieléctrico y suponemos que podemos comparar esta cavidad con un condensador de aire, la capacitancia de la cavidad es entonces representada por el condensador c, la capacitancia del dieléctrico formado por el resto de la columna de sección común a la cavidad es representada por el condensador b en serie con c. El resto de la muestra formará una capacitancia perfecta entre los electrodos bajo tensión y la podremos representar por el condensador a.

Apliquemos al conjunto una tensión senoidal progresivamente creciente; para un momento dado, y una tensión aplicada  $V_a$  fig. No. 5, la tensión a través de la cavidad sería idealmente  $V_c$ , si el condensador c fuera capaz de soportar esa tensión.

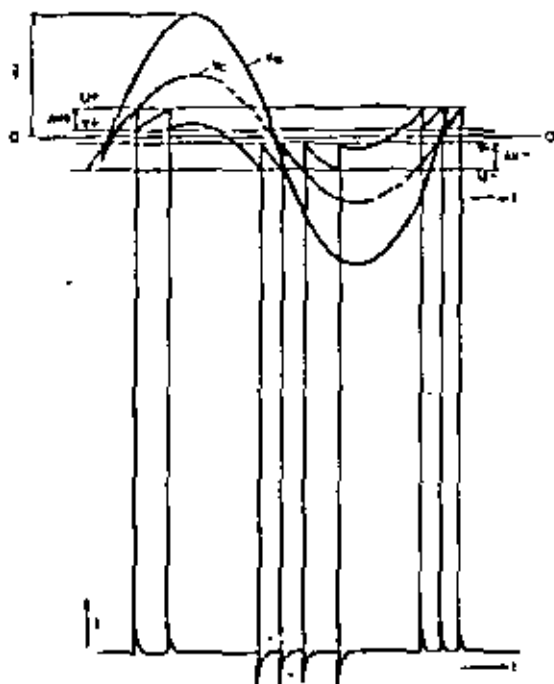


FIGURA 5

Supongamos ahora que la cavidad se llena de gas a una presión tal que la descarga del condensador c se produce a una tensión  $U_+$ ; la tensión entonces cae a  $V_+$ , valor al cual la descarga se extingue.

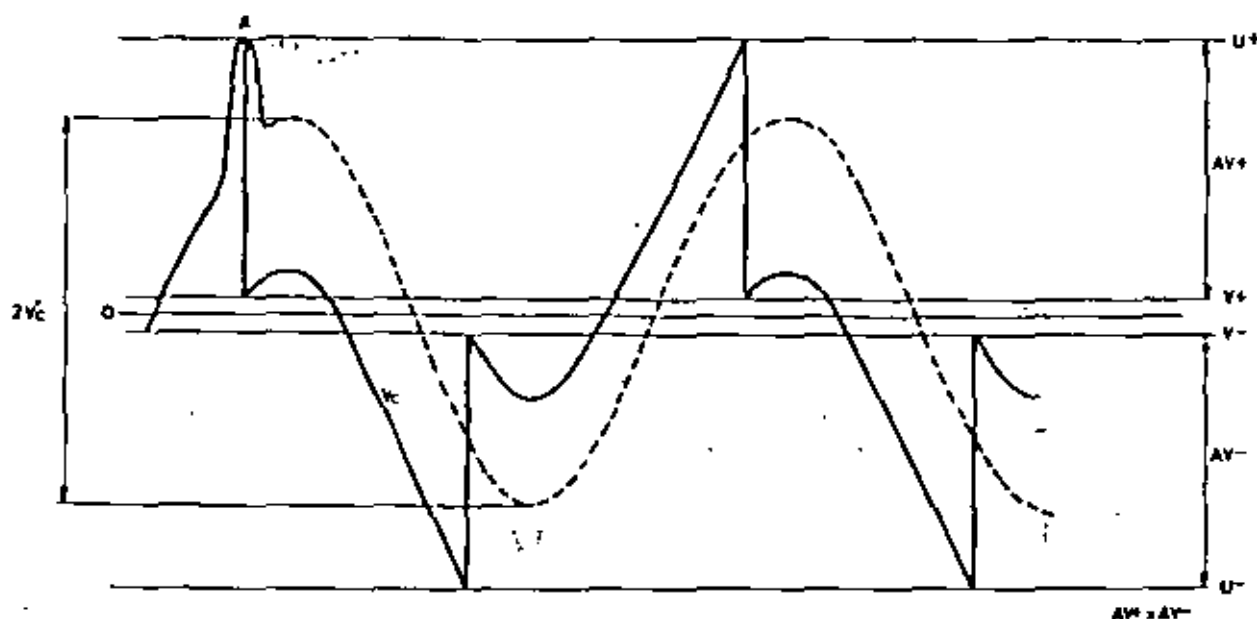


FIGURA 5

$AV^+ - AV^-$

Esta onda de tensión es prácticamente instantánea (menor de  $10^{-7}$  segundos). La descarga en menos de  $10^7$  segundos es de duración muy corta comparada con la duración de 50 cps de la onda senosoidal, por lo cual la rásda de tensión se puede tomar como una función escalonada. Después de que la descarga se ha extinguido, la tensión sobre la cavidad aumenta de nueva cuenta. Esta tensión es determinada por la superposición del campo eléctrico principal y del campo de las cargas superficiales que han quedado después de la última descarga en las paredes de la cavidad. Cuando la tensión sobre la cavidad sube nuevamente según la curva de  $V_c$  a partir de  $V^+$  y alcanza el valor de  $U^+$ , ocurrirá una nueva descarga. Este fenómeno se repite varias veces hasta que la tensión aplicada  $V_a$  sobre la muestra disminuye y la tensión  $V_c$  desplazada a  $V^+$  ya no adquiere el valor de ruptura del dieléctrico.

Las descargas nuevamente aparecen del lado negativo en el momento en que la tensión  $V_c$  llega a tener el valor de  $U^-$  (valor de ruptura del dieléctrico). Este valor  $U^-$  y el valor de  $V^-$  pueden ser diferentes de  $U^+$  y  $V^+$ . De esta manera, se encontrará grupos de descargas regularmente recurrentes, y los mismos se forman en los lugares de mayor variación de  $V_c$  (o  $V_a$ ), o sea, se localizan alrededor de los pasos de la tensión por cero.

Las descargas en la cavidad causan impulsos de corriente en las terminales de la muestra: estos impulsos se muestran en la parte inferior de la fig. 5. Ha sido demostrado por Austin y Whitehead que si las caídas de tensión en ambos semiciclos son iguales, o sea  $V^+ = V^-$ , los impulsos darán una figura estacionaria en la pantalla del osciloscopio; en caso de que las descargas no sean iguales en los dos semiciclos, las descargas tendrán un movimiento en el tiempo en relación a la frecuencia de barrido del osciloscopio.

Se da el nombre *tensión de aparición de descargas parciales*, a la tensión más baja a la cual las descargas parciales rebasan una amplitud determinada observándose bajo condiciones específicas y cuando

la tensión aplicada a la muestra es aumentada progresivamente a partir de un valor inferior al que tales descargas son observadas.

La *tensión de desaparición de descargas parciales*, es la tensión a la cual las descargas parciales que rebasan una amplitud determinada bajo condiciones específicas y cuando la tensión es disminuida progresivamente a partir de un valor que sobrepasa la tensión de aparición.

Una vez que una descarga se ha iniciado, las mismas pueden persistir a una tensión menor que la tensión de aparición, teóricamente a un valor tan bajo como la mitad del valor de la tensión de aparición, en efecto refiriéndonos a la fig. 6 y considerando que la primera descarga se inicia debido a una pequeña sobretensión en el punto A. La tensión sobre la cavidad, y que es originalmente menor a la tensión de aparición  $U^+$  o  $U^-$ , alcanza la tensión de aparición cada medio ciclo debido a las cargas superficiales que quedaron después de cada descarga.

La tensión mínima a la cual las descargas pueden existir es:

$$2V_c^1 - V^+ = U^-$$

$$V_c^1 = \frac{U^- - V^+}{2}$$

y como  $V^+$  es pequeña comparada con  $U^-$

$$V_c^1 \approx \frac{U^-}{2}$$

En la práctica, la tensión de desaparición en un aislamiento sólido es de 0 al 25% menor que la tensión de aparición. En papel impregnado, la tensión de desaparición es aún frecuentemente menor debido a la rápida formación de gas.

De hecho, los fenómenos son mucho más complejos que lo descrito, ya que existe una deformación del campo eléctrico en una descarga, que hay múltiples cavidades y que existen interacción de sus diversos esfuerzos; sin embargo, se puede concluir que las descargas parciales tienen, en general, tensiones de aparición y de desaparición bastante diferentes, cosa que no sucede en el efecto corona puro, en donde las descargas aparecen y desaparecen a la misma tensión.

#### 4. DETERIORO DE LOS DIELECTRICOS

Se ha dicho al principio que las descargas internas son causa de deterioro en los dieléctricos. El daño puede ser causado por varios fenómenos, tales como:

- Bombardeo de iones y electrones, que causan calentamiento en el ánodo y el cátodo, erosión de esas superficies y procesos químicos en la superficie como polimerización, arrastre y formación de gases.
- Formación de productos químicos en el gas ionizado, como ácido nítrico y ozono.
- Rayos ultravioleta o rayos X débiles.

Las causas difieren para cada caso y dependen fuertemente de la clase de dieléctrico.

En el deterioro de plásticos como poliestireno, polideno y politetrafluoroetileno se distinguen tres etapas. Se inicia como una erosión superficial uniforme. Esta erosión superficial puede ser causada por degradación térmica o emisión de rayos ultravioleta y rayos X débiles.

En la segunda etapa, las descargas llegan a concentrarse cerca de la periferia de la cavidad.

No se ha aclarado por qué ocurre esta concentración, pero, de cualquier manera, al concentrarse las descargas, se forman hoyos profundos en la periferia. Cuando el tamaño de los mismos crece, la energía de las descargas aumenta y, en algunos casos, se presenta carbonización en ellos. Al formarse estos hoyos, se alcanza la tercera etapa. El esfuerzo eléctrico en su cima se aproxima a la resistencia dieléctrica intrínseca del material sobre una distancia de algunos micrones debido a la concentración del campo alrededor de este lugar puntiagudo y el dieléctrico falla en esa distancia, la concentración del campo se mueve hacia un nuevo hoyo y por canales estrechos se propaga la falla, iniciándose entonces la falla total. Los canales tienen la forma de un árbol, principiando los mismos desde la inclusión en el dieléctrico, fig. No. 7.

Las dos primeras etapas pueden durar desde algunas horas a altos esfuerzos eléctricos, por ejemplo, 10 a 20 Kv/mm, hasta varios años a bajos esfuerzos, por ejemplo, 2 a 5 Kv/mm, cuando se fatiga el material a 50 HZ.

La tercera etapa, o sea la propagación de los canales, puede tomar solamente algunos ciclos para producir la falla completa.

El deterioro por descargas en aislamientos con papel impregnado ha sido estudiado por D.M. Robinson. Las descargas en huecos adyacentes al conductor atacan el aislamiento y penetran al cabo de un cierto tiempo en la primera capa de papel. Como en el caso de los aislamientos plásticos, la penetración ocurre en la esquina del hueco. Después de atacar en el seno de las primeras capas del aislamiento, se producen

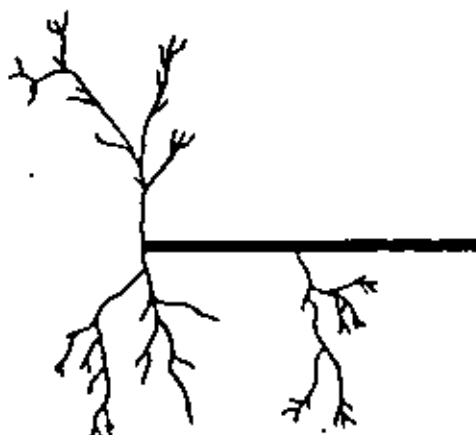


FIGURA 7

descargas superficiales a lo largo de las capas y se forman árboles y carbonización. Los caminos ocurren en los puntos más débiles del aislamiento, por ejemplo, en las uniones entre cintas de papel, fig. No. 8. Al pie del árbol se producen calentamientos locales, que causan finalmente una falla térmica completa.

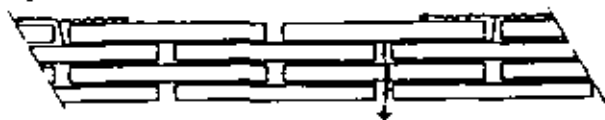


FIGURA 8

#### 5. MAGNITUD DE LAS DESCARGAS

Refiriéndose a la figura No. 1 nuevamente, se ve que la carga puesta en juego en cada descarga, si se considera que b y c son de pequeña capacitancia con relación a la capacitancia a, es:

$$q_1 = \left( c + \frac{ab}{a+b} \right) \Delta V = (b+c) \Delta V$$

en donde  $\Delta V$  es el incremento de la tensión en las terminales de c, debido a la descarga.

(Anteriormente lo denominamos  $U + .V +$ ).

Desgraciadamente, este valor de  $q_1$  no es medible, pues no recorre las conexiones externas del aislamiento y, por otra parte, no se conocen b y c.

Otra carga, ésta sí accesible a medición, es la carga aparente de transmisión del aislante, y que se expresa como:

$$q \propto a \Delta V_a$$

El incremento de tensión que esta descarga produce en las terminales del aislante, se puede deducir por:

$$\Delta V_a = \frac{b}{a+b} \Delta V$$

de donde se ve que la medida de  $\Delta V_a$  permite, pues, deducir la carga aparente q:

$$q = b \Delta V$$



la cual es una bastante buena imagen de la energía disipada por la descarga en el seno del dieléctrico. Se puede demostrar, por hipótesis simplificadas, que la energía disipada se puede expresar por:

$$W = 0.7 q V_i$$

donde  $V_i$  es la tensión eficaz de aparición de las descargas parciales.

Lo anterior prueba que la magnitud  $q$  de las descargas (expresada generalmente en picocoulombs PC), está en relación directa con la energía disipada en las cavidades, en el momento de la aparición de las descargas.

Otro método de evaluación de la energía de las descargas es la medida de la potencia consumida por las pérdidas y que se puede medir con un puente de Schering, pero es necesario para ello que las descargas sean lo suficientemente numerosas y fuertes, lo que no se produce más que en algunos tipos de aislantes; también en general esta medición no hace distinción entre pocas descargas grandes que pueden ser peligrosas y muchas pequeñas que pueden ser inocuas.

## 6. METODOS DE DETECCION

Las descargas parciales dan lugar a numerosos fenómenos secundarios, los cuales pueden ser usados como medios de detección de las mismas.

Los métodos de detección se clasifican en dos grandes grupos; a saber:

- Métodos de detección no eléctricos.
- Métodos de detección eléctricos.

Los primeros no son usados frecuentemente debido a que, en muchos casos, son menos sensitivos que los métodos eléctricos.

En este estudio nos referimos principalmente a los métodos eléctricos.

Entre los métodos de detección no eléctricos, podemos citar los siguientes:

**Detección por luz** - Este método se puede usar para las descargas superficiales, o bien, para las descargas internas en dieléctricos translúcidos; la técnica que se emplea es la detección visual, fotográfica o fotoeléctrica.

Para las descargas superficiales se pueden obtener hasta una sensibilidad de 1 PC., y para las internas, la sensibilidad es del orden de 50 PC.

**Detección por calor** - Sólo pueden ser detectadas las descargas internas importantes, que ya han causado deterioro en el dieléctrico; la sensibilidad de este método es muy pobre y se puede hacer la detección tocando con la mano la muestra bajo prueba, o bien, por métodos termoelectrónicos.

**Detección por ruido** - Se emplea para descargas superficiales y descargas internas; la sensibilidad en casos favorables es de 5 a 50 PC.; se pueden emplear el oído o bien audífonos.

**Detección por presión de gas** - Se emplea para descargas internas y sólo en espacios de aire accesibles; su sensibilidad es desconocida y se usan manómetros.

**Detección por transformaciones químicas** - Se emplea sólo para descargas internas en objetos que puedan ser demolidos, o bien, para descargas superficiales; este método no tiene sensibilidad y su detección se hace por medio visual o químico.

Los métodos de detección eléctrica se basan en el principio de las descargas en una muestra causan impulsos de corriente en sus terminales.

Están en uso una gran variedad de circuitos para detectar estos impulsos, pero todos ellos se pueden reducir a uno básico, figura No. 9, con los siguientes elementos:

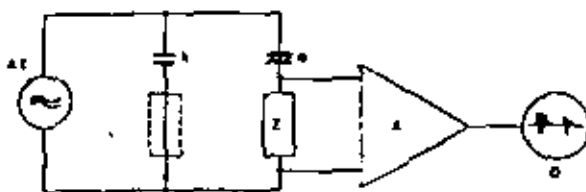


FIGURA 9

- Fuente de alta tensión.
- Muestra "a" sometida a prueba y afectada de descargas.
- Impedancia de entrada "Z" a través de la cual se producen impulsos de tensión causados por los impulsos de corriente en la muestra; esta impedancia puede ser un circuito RC o un circuito LRC.
- Condensador de acoplamiento "K" que tiene por función facilitar el paso de los impulsos de corriente de alta frecuencia.
- Amplificador "A".
- Unidad de observación "O", que puede ser, por ejemplo, un voltmetro, osciloscopio o un audífono.

Se pueden distinguir tres grupos de métodos eléctricos de detección:

- a) Los métodos directos, en que los impulsos de corriente en la muestra son transformados en impulsos de tensión, los cuales son amplificados y observados.
- b) Los métodos balanceados, en los que los impulsos son observados como en a, pero se toman ciertas medidas para que los disturbios causados en la fuente de alta tensión, conexiones, boquillas, terminales, etc. sean eliminados.
- c) Los métodos de pérdida, en los cuales es medida la potencia disipada por los impulsos de corriente.

Estos métodos se caracterizan por dos cualidades importantes: la sensibilidad y la resolución; entendiéndose por sensibilidad la menor descarga (en picocoulombs) que se puede detectar; y por resolución, el número de impulsos que se pueden separar por unidad de tiempo, por ejemplo, el número de impulsos que se pueden distinguir en un cuadrante de una onda senosoidal de 50 HZ.

A continuación, se dará un ejemplo de un circuito de cada uno de los tres métodos de detección eléctrica.

Para la detección directa, tenemos el circuito LCR de Mole, figura No. 10, que da una sensibilidad óptima. La fuente de alta tensión deberá ser libre de descargas parciales, pudiéndose poner un filtro para bloquear los disturbios que vienen de la fuente o del transformador; el circuito LCR es colocado en serie con el capacitor de bloqueo, el cual deberá ser también libre de descargas. Según la capacitancia de la

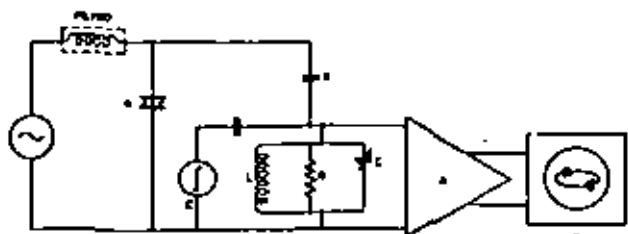


FIGURA 10

muestra, se puede cambiar el elemento LCR para obtener la máxima sensibilidad, el amplificador de este detector es de banda ancha 40 a 250 KHZ y su sensibilidad es menor a 0.1 PC en una muestra de 1000 PF.

La detección balanceada es usada cuando no se pueden eliminar las perturbaciones externas por el método directo; se emplean dos impedancias de entrada iguales, con un extremo común, figura No. 11. De esta forma, los impulsos de descargas externas a la muestra se dividen a través de esas dos impedancias, balanceándose el circuito y únicamente el impulso resultante que es menor al original entra al circuito de detección; un impulso de descarga en la muestra entra directamente, resultando, por lo tanto, que los impulsos externos son de una magnitud menor a los internos en la muestra. Con este tipo de detección se obtiene la máxima sensibilidad si en lugar de poner el capacitor de bloqueo se conecta otra muestra idéntica en su lugar.

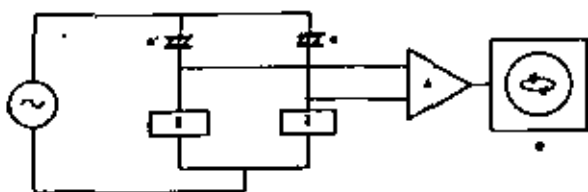


FIGURA 11

Un método bien conocido para detectar las descargas por medio de medición de pérdidas es el del puente de Schering. En este método se hace un diagrama en el cual la tangente de pérdida ( $\text{tg } \delta$ ) se traza en función de la tensión aplicada, figura No. 12. Un cambio rápido en la tangente es atribuido a descargas internas. El principio de este aumento es tomado como la tensión de aparición.

Generalmente, son necesarias muchas descargas para obtener un aumento de tangente notorio; en una muestra de 1000 PF la descarga menor detectable es del orden de 50 PC, por lo cual, aún usando los mejores puentes, resulta bastante insensible.

Otro método empleado para la detección de descargas por medio de las pérdidas es empleando un dispositivo electrónico que integra los impulsos y éstos son medidos en combinación con la tensión aplicada a la muestra por medio de un wattmetro, figura No. 13.

Finalmente, se dará a continuación un resumen sobre los métodos de detección eléctricos que se recomienda emplear para algunos de los aparatos de alta tensión:

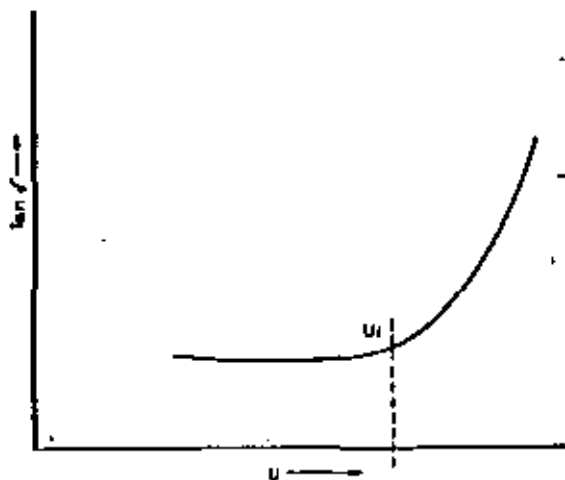


FIGURA 12

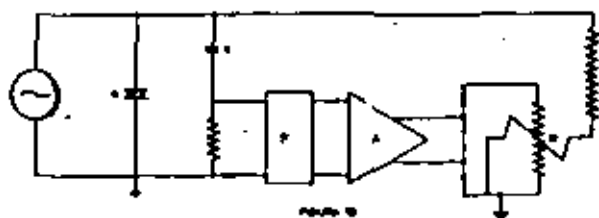


FIGURA 13

**Capacitores impregnados en aceite** - En ellos se pueden detectar restos de gas y humedad en el aislamiento, formación de gas y caminos de arrastre superficiales causados por sobretensiones. Se puede emplear para su detección cualquier tipo de detector eléctrico, pero es más recomendable utilizar el método balanceado, en donde se pone como capacitor de acoplamiento uno idéntico al que se está probando. De esta manera, los disturbios externos son eliminados.

**Capacitores aislados con plástico** - En ellos, los defectos detectables son principalmente las cavidades en el aislamiento y se puede emplear, como en el caso anterior, cualquier método de detección, pero de preferencia, el balanceado.

**Cables aislados con plástico** - Se puede detectar en ellos cavidades e inclusiones, partes de metales, el espacio entre conductor y aislamiento y un apantallado imperfecto. Se emplean de preferencia métodos balanceados, aunque se pueden emplear métodos directos con limitaciones; para cables mayores de 100 mts. se recomienda usar banda de menos de 200 kc/s.

**Boquillas** - Se pueden emplear la mayoría de los métodos eléctricos y, en este caso, métodos no eléctricos, como por luz y sonido, son de gran ayuda. Se detectan cavidades, inclusiones, caminos de arrastre, espesor de aislamiento y descargas superficiales.

**Transformadores impregnados en aceite** - Se detectan restos de gas y humedad en el aislamiento, formación de gas y caminos de arrastre por sobretensiones, particularmente en campos no uniformes, y solución de gas en el sistema conservador de aceite.

Se emplean los sistemas de detección eléctricos con circuitos de entrada principalmente resistivos y con

ancho de banda menor de 100 a 200 Kc/s.

*Transformadores moldeados en resina* - Se emplean los mismos sistemas que en el caso anterior y se detectan cavidades, inclusiones, caminos de arrastre, conductores flojos, etc.

*Máquinas rotativas* - La detección del bobinado completo es difícil debido a la atenuación de los pulsos:

sin embargo, como en el caso de los transformadores, se recomiendan detectores con banda menores a 100 Kc/s. En las barras solas se pueden emplear la mayoría de los métodos.

En este tipo de equipo se detectan cavidades, espesores de aislamiento y descargas superficiales.

# Nuevas Técnicas para la Verificación del Aislamiento de Transformadores de Instrumento

Ing. Pedro Maigler  
Electrotécnica Balteau, S.A. de C.V.

Las pruebas dieléctricas tradicionales, tales como las pruebas de potencial aplicado, de tensión inducida y de impulso no constituyen una garantía para el buen funcionamiento de los transformadores en resina de tensiones nominales iguales o superiores a 34.5KV y de los transformadores herméticos en aceite de tensiones nominales iguales o superiores a 69 KV.

Es necesario contar con algún medio capaz de detectar la posible existencia de pequeños poros en los materiales aislantes colados, tales como la resina epoxy y de humedad o burbujas en los transformadores de alta tensión en los que se siguen utilizando aislamientos de papel impregnado en aceite. Por su diseño, estos transformadores se ven sometidos a esfuerzos dieléctricos muy elevados y cualquier defecto en el proceso de fabricación o en los materiales aislantes utilizados puede ser causa de una falla prematura.

Estas faltas se deben al deterioro producido por descargas parciales en el seno de un dieléctrico sólido o líquido, alrededor de una arista o a lo largo de una superficie parcialmente conductora. Las descargas parciales se han definido como descargas que no ponen en corto circuito a 2 electrodos de polaridad opuesta.

Aunque las descargas parciales solo liberan cantidades pequeñas de energía, si son causa de un deterioro progresivo de las propiedades dieléctricas de los materiales aislantes.

El mecanismo básico de las descargas, así como el tipo y efecto del deterioro ha sido objeto de otro trabajo<sup>1</sup>.

En este trabajo se darán los métodos eléctricos para la detección de descargas parciales y algunas recomendaciones particulares para la prueba de transformadores de potencial y de corriente.

Por otro lado, se hablará también de las pruebas de factor de potencia, ya que se ha observado que éste varía al aparecer cierto tipo de descargas.

## 2.- DETECCION Y MEDICION DE DESCARGAS PARCIALES.

### 2.1 Definición de cantidades relacionadas con las descargas.

#### 2.1.1 Carga Aparente (q)

Es la carga que inyectada instantáneamente en las terminales del objeto bajo prueba, cambiaría momentáneamente la tensión entre sus terminales, en la misma cantidad que lo haría la descarga parcial misma.

La variación de tensión es aproximadamente

$$\Delta V \approx q / C_0 \approx V_0 W / C_0 V_0$$

en donde  $C_0$  es la capacitación del objeto bajo prueba. La carga aparente no es igual a la carga realmente transferida a través de la cavidad del dieléctrico. Sin embargo, la carga aparente es la única medible. Sus unidades están dadas en picocoulombs.

#### 2.1.2 Frecuencia de repetición (n)

Es el promedio de descargas parciales por segundo.

#### 2.1.3 Energía de una descarga (w)

Es la energía disipada por una descarga individual. Puede ser representada como

$$w = V_2 \times \frac{1}{2} q V_1$$

Sus unidades están dadas en joules.

### 2.1.4 Corriente promedio de descarga (I)

Es la suma de los valores absolutos de las cargas que pasan a través de las terminales del objeto bajo prueba, durante un cierto intervalo de tiempo T dividido entre T.

$$I = \frac{1}{T} (|q_1| + |q^2| + |q^3| + \dots + |q^n|)$$

Si todas las descargas son de la misma magnitud.

$$I = n |q|$$

Sus unidades están dadas en coulomb / segundo = amperes.

### 2.1.5 Potencia de las descargas (P)

Es la potencia promedio entregada a las terminales del objeto bajo prueba debido a las descargas parciales durante un intervalo de tiempo T.

$$P = \frac{1}{T} (q_1 V_1 + q_2 V_2 + \dots + q_n V_n)$$

en donde  $V_1, V_2, \dots, V_n$  son valores instantáneos de tensión entre las terminales del objeto bajo prueba en los instantes de las descargas  $q_1, q_2, \dots, q_n$ .

Sus unidades están dadas en Watts.

NOTA: En los puntos 2.1.4 y 2.1.5, el intervalo de tiempo T, debe ser largo comparado con la duración de un ciclo de la tensión de prueba.

### 2.1.6 Tensión de radio interferencia. —

Es la tensión con frecuencia entre los límites 0.015 a 30 MHz que aparece en los conductores de equipo eléctrico de alta tensión.

Esta magnitud es proporcional a la magnitud, duración y frecuencia de repetición de los impulsos, así como de las constantes de tiempo del circuito de prueba y del instrumento indicador.

Sus unidades están dadas en Microvolts.

### 2.1.7 Tensión de aparición de las descargas ( $V_i$ )

Es la tensión eficaz más baja a la cual las descargas parciales rebasan una magnitud especificada, cuando la tensión aplicada al objeto se aumenta progresivamente.

### 2.1.8 Tensión de extinción de las descargas ( $V_e$ )

Es la tensión eficaz a la cual se extinguen las descargas parciales que rebasan una magnitud especificada, cuando la tensión se disminuye progresivamente a partir de un valor que sobrepasa la tensión de aparición.

## 2.2. Circuitos de prueba

La mayoría de los circuitos utilizados para las pruebas de descargas parciales puede ser desarrollado de alguno de los tres circuitos básicos mostrados en la fig. 1a, b, y c.

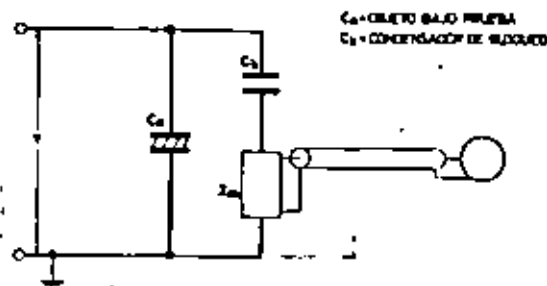


FIG. 1a INSTRUMENTO CONECTADO EN SERIE CON EL CONDENSADOR DE BLOQUEO

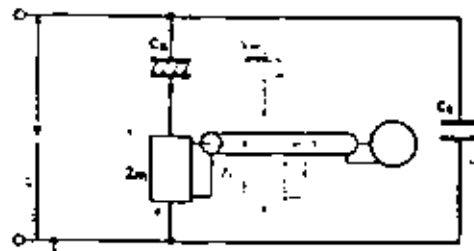


FIG. 1b INSTRUMENTO CONECTADO EN SERIE CON EL OBJETO BAJO PRUEBA

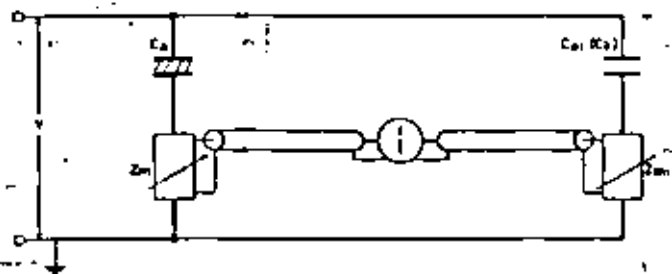


FIG. 1c CIRCUITO BALANCEADO

Cada uno de estos circuitos consta principalmente de:

- el objeto bajo prueba que puede ser representado como un condensador ( $C_p$ ) (Los devanados deben representarse adecuadamente ya que consta de capacitancias e inductancias distribuidas)

- un condensador de bloqueo,  $C_b$  (o bien un segundo objeto bajo prueba,  $C_p$ , en el caso de utilizar el circuito balanceado).

Si el condensador de bloqueo carece de pérdidas puede ser utilizado también para la prueba de factor de pérdidas del objeto bajo prueba.

- una unidad de entrada o de acoplamiento  $Z_m$  que se adapte a las características del amplificador.

Puede estar compuesta por una resistencia o por un circuito RLC.

La unidad de entrada debe estar diseñada para dejar pasar únicamente los componentes de alta frecuencia.

Sus componentes, en combinación con el objeto de prueba, el condensador de bloqueo y las capacitancias a tierra del transformador elevador, determinan la forma y duración de los impulsos detectados.

En caso de utilizar el circuito balanceado, deberá contarse con una segunda unidad de entrada  $Z_{m1}$ .

- Amplificador con los instrumentos necesarios para evidenciar y cuantificar cualquiera de las magnitudes definidas en 2.1.1 a 2.1.5.

La banda pasante del amplificador puede ser ancha o estrecha.

- Un transformador de aislamiento o un filtro si es necesario reducir las interferencias de la red o las radiointerferencias.

Como equipo adicional a los circuitos básicos se requiere en la mayoría de los casos de:

- Un equipo de control.
- Un transformador elevador, libre de descargas parciales.

### 2.3 Instrumentos de Medición

Existen en el mercado varios instrumentos para la detección de descargas parciales. Estos pueden ser clasificados de acuerdo con las magnitudes medibles definidas en los incisos 2.1.1, a 2.1.5.

#### 2.3.1. Instrumentos para la Detección y Medición de Descargas Individuales.

Los impulsos resultantes de descargas individuales al tener valores de cresta proporcionales a la carga aparente  $q$  pueden ser observados sobre la pantalla de un osciloscopio utilizando ya sea un barrido elíptico sincronizado con la tensión de prueba o bien un barrido lineal accionado por los impulsos.

La magnitud de cualquier descarga proveniente de las terminales del objeto bajo prueba, puede ser calculada comparando su amplitud con la de un pulso de calibración que se inyecta en la unidad de entrada para este fin (Ver los detalles en el inciso 2.4)

La amplitud de la carga aparente más grande durante un intervalo de tiempo corto (Del orden de algunos ciclos de la tensión de prueba) puede ser medida también mediante un voltmetro calibrado en picocoulombs<sup>3</sup>.

Es importante que la resolución del instrumento, que se define como el intervalo entre impulsos sucesivos, sea inferior a  $100 \mu \text{ seg}$  para evitar la sobreposición de descargas en el momento de su aparición.

La resolución depende de los siguientes factores:

- La calidad de la pantalla del osciloscopio.
- La constante de tiempo del circuito.
- El ancho de banda del amplificador.

#### 2.3.2 Instrumentos para la Medición de la Frecuencia de Repetición.

Se puede utilizar cualquier tipo de contador electrónico de pulsos en combinación con un discriminador que descarte impulsos inferiores a un valor ajustable predeterminado.

El contador puede indicar el número de pulsos durante un intervalo determinado o bien el número promedio de impulsos por segundo.

Este método es de utilidad para trazar las distribuciones de frecuencia de repetición con respecto a diferentes amplitudes de impulsos.<sup>4</sup>

Si los impulsos son oscilantes deben tomarse precauciones para evitar que el contador registre más de una indicación por impulso.

#### 2.3.3 Instrumentos para la Medición de la Corriente Promedio de Descarga.

Estos instrumentos miden la corriente promedio de los impulsos después de ser amplificados y rectificadas.

#### 2.3.4 Medidores de radio Interferencia Utilizados para la Detección de Descargas Parciales.

En varias normas se especifican los circuitos e instrumentos para la medición de radio interferencia<sup>5,6</sup>. Estas normas fueron elaboradas para la protección de los usuarios de radio y televisión contra las radiaciones perturbadoras emitidas por los aparatos de alta tensión y su cumplimiento no constituye más que un criterio indirecto de la calidad de un aislante, pues un aparato debe estar libre a la vez de descargas internas y externas.

La respuesta de estos medidores generalmente está determinada por un filtro con un ancho de banda estrecho con una frecuencia media determinada, que generalmente se sitúa en 1 MHz y un circuito de medición con constantes de tiempo de carga, descarga y mecánica definidas.

Si los pulsos son cortos y si se repiten regularmente, la lectura  $V_r$  del instrumento es proporcional a la amplitud de la carga aparente  $q$  y a la frecuencia de repetición.

$$V_r \approx |q| \cdot f(n) \cdot \Delta f \cdot Z_m \cdot k$$

en donde

- $f(n)$  es una función no lineal de  $n$
- $\Delta f$  es el ancho de banda del instrumento
- $Z_m$  es la impedancia de la unidad de entrada y debe ser puramente resistiva
- $k$  es un coeficiente que depende del objeto bajo prueba y del circuito de prueba.

La lectura no es necesariamente proporcional a la impedancia  $Z_m$  si ésta tiene capacitancia o inductancia parásitas. Si las descargas no se presentan regularmente sino en forma errática (Como sucede en la mayoría de los casos) el término  $f(n)$  no es aplicable. La equivalencia entre  $\mu V$  y  $pC$  ha sido objeto de muchas discusiones que han sido publicadas en algunos artículos.

A título de información se darán algunas equivalencias publicadas.

La publicación 270 del CIE indica que si no es posible calibrar el circuito (Aplicando impulsos con repeticiones regulares a una frecuencia igual aproximadamente al doble de la frecuencia de la tensión de prueba) se considera la equivalencia de  $1 \mu V = 1 pC$  para la medición de descargas permanentes hecha cerca de la tensión de aparición para una frecuencia de repetición de 100 impulsos / seg., con una resistencia de la unidad de entrada de 150 ohms.

En el artículo de referencia<sup>2</sup> los autores determinaron experimentalmente en un circuito con  $C_0 = C_A = 1000 \text{ pF}$  y con un instrumento con ancho de banda de 6 dB la equivalencia de  $0.6 \mu\text{V} = 1 \text{ pC}$ . En otro artículo<sup>3</sup> se establece la equivalencia de  $1 \mu\text{V} = 2.6 \text{ pC}$  para una frecuencia de repetición de 100 pulsos/seg., un ancho de banda de 9 kHz y una resistencia de la unidad de entrada de 60  $\Omega$ . La relación es válida siempre y cuando el condensador de bloqueo  $C_0$  sea grande en comparación con la capacitancia del objeto bajo prueba.

### 2.3.5. Características de algunos Instrumentos Comerciales.

A título de comparación, se dan a continuación los anchos de banda de los instrumentos más utilizados.

LCIE (Francés): 40 kHz centrados en 472 kHz estrecha)

Norma VDE (Alemana): 9 kHz centrados en 1.9 MHz (muy estrecha).

KRENGER (Holandés): 10 - 150 kHz.

J. BIDDLE (AMERICANO): 20 - 60 kHz.

ERA MODEL 3 (Inglés): 40 - 250 kHz.

este último es probablemente el que está encontrando la mayor aceptación en los laboratorios de alta tensión por sus múltiples ventajas, tales como:

- Unidades de entrada intercambiables para acoplar con aparatos de capacitancias entre límites muy amplios (Entre 6 pF y 250  $\mu\text{F}$ ).
- Un generador de pulsos de calibración que inyecta pulsos de magnitud conocida y ajustable  $V_0$  a través de un condensador  $C_0$ . El pulso de calibración se ajusta sobre la pantalla a la amplitud de las descargas provenientes del objeto bajo prueba, la carga aparente valdrá entonces:  $q = V_0 C_0 (1 + C_A / C_A) \approx V_0 \cdot C_0$ .
- Un interruptor para realizar los pulsos positivos o negativos facilitando la distinción entre descargas internas o externas.
- Marcas de máxima y mínima tensión sobre la elipse que facilitan la distinción entre descargas internas de descargas provenientes de una punta, falsos contactos u otra interferencia (Ver inciso 2.7).

- Siendo un instrumento de banda ancha, permite la visualización sobre la pantalla de un osciloscopio de descargas individuales que tienen más o menos la misma estructura que las descargas provenientes del aparato bajo prueba.

El argumento principal en contra de los instrumentos de radio interferencia es que con éstos, las descargas pequeñas, constantes, repetitivas e inocuas, pueden dar la misma indicación que pocas descargas grandes, variadas y nocivas para la vida del aislamiento.

## 2.4 Calibración.

La calibración de un circuito de detección de descargas consiste en determinar el coeficiente de atenuación o sea el factor que da la relación entre la amplitud medida y la magnitud de la descarga en el objeto de prueba en las condiciones de prueba.

Además, tiene por objeto determinar la sensibilidad

del circuito o sea establecer la mínima descarga que puede ser medida. La mínima descarga detectable depende también del nivel de las interferencias (Ver inciso 2.5).

Se darán únicamente los métodos de calibración para los instrumentos de medición de descargas individuales ya que como se vio en el inciso 2.3.4 la respuesta de los medidores de radio interferencia depende de muchos factores.

La calibración involucra dos procedimientos a saber:

- Verificación de las características del instrumento de medición, incluyendo la calibración del pulso patrón si éste viene incorporado en el instrumento.
- Calibración del circuito de prueba completo.

### 2.4.1. Calibración del Instrumento de Medida.

Esta consiste en inyectar pulsos ( $q_0$ ) de magnitud conveniente y conocida en la unidad de entrada. Estos pulsos se producen mediante un generador que emite impulsos rectangulares de tensión ( $V_0$ ) en serie con un pequeño condensador de magnitud conocida ( $C_0$ ).

El tiempo de aumento de la onda cuadrada y la capacitancia  $C_0$  deben ser tan pequeño que la duración de un pulso de corriente por  $C_0$  sea pequeña comparado con el tiempo de respuesta del instrumento. El tiempo de amortiguamiento de la onda cuadrada debe ser largo comparado con dicho tiempo. En estas condiciones la amplitud del pulso valdrá:

$$q_0 = V_0 \cdot C_0$$

### 2.4.2 Calibración del Circuito de Prueba

Esta consiste en inyectar pulsos ( $q_0$ ) de magnitud conocida entre las terminales del objeto bajo prueba, las conexiones del generador de pulsos dependiendo del circuito de prueba se muestra en las fig. 2<sub>a</sub> y 2<sub>b</sub>.

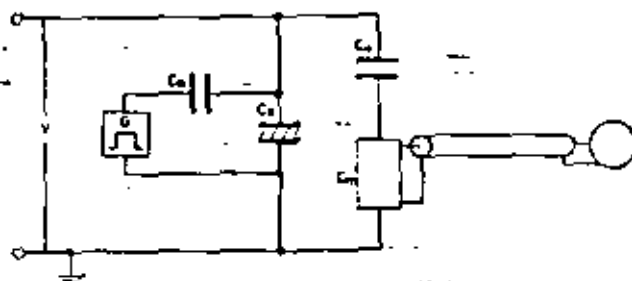


FIG. Nº 2a CONEXIONES PARA LA CALIBRACION DEL CIRCUITO DE PRUEBA COMPLETO

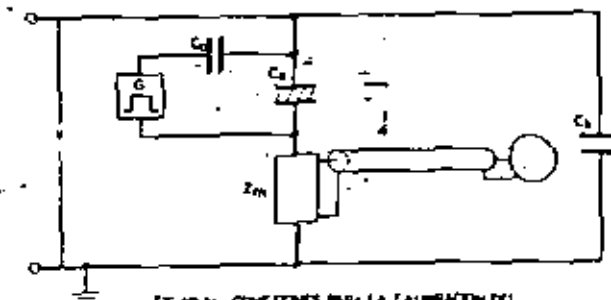


FIG. Nº 2b CONEXIONES PARA LA CALIBRACION DEL CIRCUITO DE PRUEBA COMPLETO

Los pulsos pueden obtenerse del mismo generador descrito en el punto 2.4.1, siempre y cuando la capacitancia del condensador  $C_0$  sea inferior a  $0.1 C_0$ . Bajo estas condiciones el pulso de calibración será equivalente a una descarga de amplitud:

$$q_0 = V_0 C_0$$

**2.4.3. Determinación del Factor de Atenuación K.** Tanto en 2.4.1 como en 2.4.2 aparecerán sobre la pantalla del osciloscopio pulsos de una determinada amplitud provenientes del generador externo  $V_0$ .

Con la ayuda del atenuador asociado con el pulso patrón incorporado en el instrumento se iguala la amplitud del pulso patrón proveniente del generador incorporado con el pulso ( $q_1$ ) proveniente del generador autónomo.

Si para la conexión según 2.4.1 el pulso medido vale  $q_1$  y para la conexión 2.4.2  $q_2$ , el factor de atenuación valdrá:

$$K = \frac{q_1}{q_2}$$

**NOTA:** Este factor se ve afectado por las características del circuito de prueba, en particular por la relación  $\frac{C_0}{C_1}$ . Por este motivo, la calibración únicamente es válida para un tipo de aparato y disposición de prueba y debe repetirse para objetos diferentes de prueba.

## 2.5. Interferencia

### 2.5.1 Tipo de Interferencia

La interferencia en la medición de descargas parciales puede estar causada por 2 tipos de perturbaciones.

- Perturbaciones independientes a la tensión de la prueba aplicada al objeto bajo prueba.

Pueden ser causadas por maniobras de conexión o desconexión en otros circuitos, máquinas con conmutadores, pruebas de alta tensión en la cercanía, radio interferencia, etc.

- Perturbaciones asociadas con la tensión de prueba.

Generalmente estas perturbaciones aumentan al aumentar la tensión. Incluyen por ejemplo, descargas parciales en el transformador elevador, conductores de alta tensión de sección muy pequeña, chisporroteos debido a falsos contactos o a objetos cercanos mal conectados a tierra. En algunos casos no aumentan con la tensión, por ejemplo, perturbaciones provenientes de motores con un número elevado de revoluciones, taladros y soldaduras eléctricas, etc.

### 2.5.2 Identificación y Recomendaciones para Reducir las Interferencias.

Las perturbaciones independientes a la tensión de prueba pueden ser detectadas cuando el circuito de prueba no está energizado, la manera práctica de eliminar esta interferencia es colocando todo el circuito de prueba en una cámara blindada.

Para comprobar la presencia de perturbaciones asociadas con el circuito de prueba, se recomienda sustituir el objeto de prueba por un condensador libre de descargas parciales hasta la tensión de prueba.

El empleo de un osciloscopio con barrido elíptico puede ser un medio muy eficaz para distinguir entre descargas provenientes del objeto bajo prueba o del circuito externo. Las descargas provenientes de una punta, son fácilmente reconocibles.

Sin embargo, algunas descargas externas no son fácilmente reconocibles, por tener la apariencia de descargas internas. Estas descargas generalmente provienen de superficies polvosas, objetos cercanos a potencial flotante, falsos contactos en el circuito de tierra. La interferencia proveniente de la red, puede ser suprimida mediante filtros adecuados que generalmente se colocan del lado de baja tensión.

En algunos casos basta con poner un transformador de aislamiento.

Es indispensable hacer buenas conexiones y contar con una buena tierra<sup>9</sup>. Es recomendable utilizar cables blindados lo más cortos posible con la pantalla conectada a tierra por ambos extremos del cable.

En algunos casos el circuito balanceado permite distinguir entre descargas en los objetos bajo prueba y descargas externas. Este circuito además tiene la ventaja de suprimir las interferencias de la red.

### 2.5.3 Magnitud de la Interferencia.

Aunque es difícil dar valores definidos para la magnitud de las descargas, puede decirse que en áreas industriales las interferencias son equivalentes a descargas de algunos centenares de picocoulombs.

En una cámara blindada con todas las estructuras metálicas efectivamente conectadas a tierra y con las precauciones mencionadas arriba para suprimir las interferencias de la red, la mínima descarga detectable dependerá del propio circuito de prueba y sobre todo del instrumento de medición. Un valor práctico y aceptable de interferencia para la prueba de transformadores de instrumento con  $C_0 = 500$  pF en una cámara blindada es de 0.5 pC.

## 2.6 Localización de Descargas.

La localización de las descargas es conveniente por las siguientes razones:

- Permite determinar la causa de las descargas y en algunos casos permite su eliminación.
- Mejorar diseños y construcciones subsecuentes.
- Conociendo el lugar de las descargas es posible determinar si cierto tipo de descargas son admisibles sin reducir las cualidades dieléctricas del objeto bajo prueba.

La localización puede ser relativamente sencilla si las descargas provienen de lugares accesibles pero es difícil si éstas se originan entre capas de un devanado o en el seno de un dieléctrico líquido o sólido.

Se han desarrollado varios métodos para la localización de descargas tales como:

- Detección de ondas sonoras producidas por las descargas (10, 11, 12).
- Midiendo el intervalo de tiempo entre la llegada a cualquiera de los extremos de un devanado de



la onda dirigida a un extremo y la onda reflejada del otro<sup>13</sup>.

• Mediante rayos X ya que éstos disminuyen la tensión de aparición de las descargas<sup>14</sup>.

En muchos casos la forma de las descargas sobre la pantalla de un osciloscopio pueden identificar el origen de las descargas.

Los métodos no eléctricos como la detección visual o fotográfica en la oscuridad son medios muy eficaces para la detección de descargas en lugares accesibles.

### 2.7. Interpretación de las Descargas.

Cuando las descargas se visualizan sobre la pantalla de un osciloscopio con barrido elíptico es posible señalar sobre la elipse los pasos de la tensión por cero y los lugares donde la tensión es máxima.

De la disposición de las descargas sobre la elipse, así como de su aspecto (Grandes o pequeñas, juntas o aisladas, hacia el exterior o el interior de la elipse), se puede deducir de qué tipo de descargas se trata (Internas o externas, de falsos contactos, etc.).

Los principales tipos así como su interpretación se dan en la fig. 3.

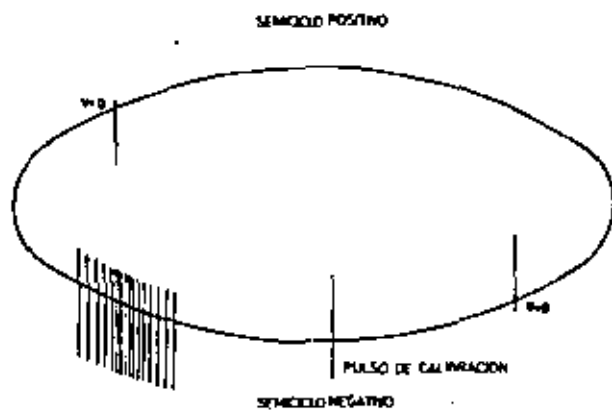


FIG. Nº 3: DESCARGAS POR EFECTO CORONA (PRODUCCION POR UNA ARISTA DEL LADO DE ALTA TENSION)

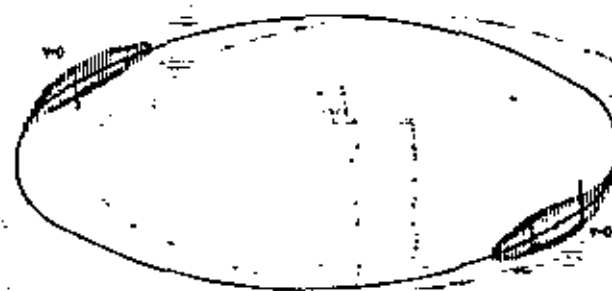


FIG. Nº 30 FALSO CONTACTO

En caso de que no se haya utilizado un osciloscopio para visualizar las descargas (Métodos NEMA, VDE, etc.) suele trazarse una curva que da la intensidad de las descargas en  $\mu V$  o  $pC$  en función de la tensión de prueba. En la figura 4 se dan algunos ejemplos de estas curvas con sus conclusiones respectivas.

### 2.8 Procedimiento de Prueba.

Con el objeto de obtener resultados reproducibles, es necesario respetar ciertas condiciones y seguir un procedimiento determinado de prueba que generalmente consiste en:

- Aumentar la tensión hasta un determinado valor, mantenerla durante un cierto tiempo y observar si aparecen descargas.
- Si aparecen descargas antes de la tensión máxima a aplicar, anotar la tensión de aparición y la magnitud de las descargas. Llegar hasta la tensión máxima anotando la magnitud. A continuación disminuir paulatinamente la tensión anotando la tensión de extinción. Como las descargas pueden tener un comportamiento errático, se recomienda repetir la operación anterior bajando cada vez únicamente hasta la tensión de extinción hasta obtener valores consistentes de tensión.

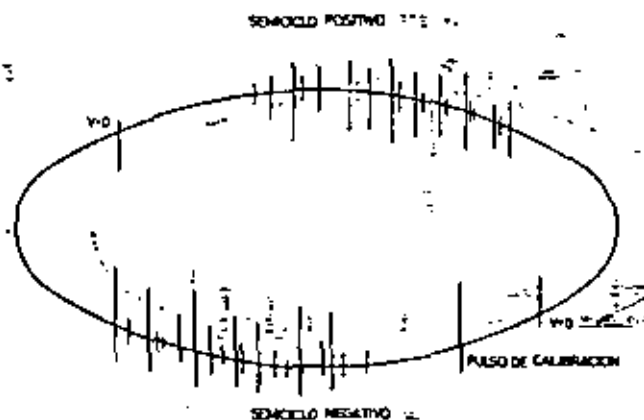


FIG. Nº 24 DESCARGAS INTERNAS EN EL SENO DE UN AISLANTE

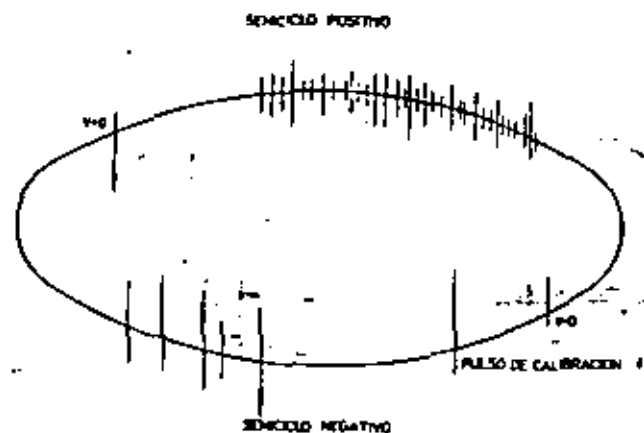
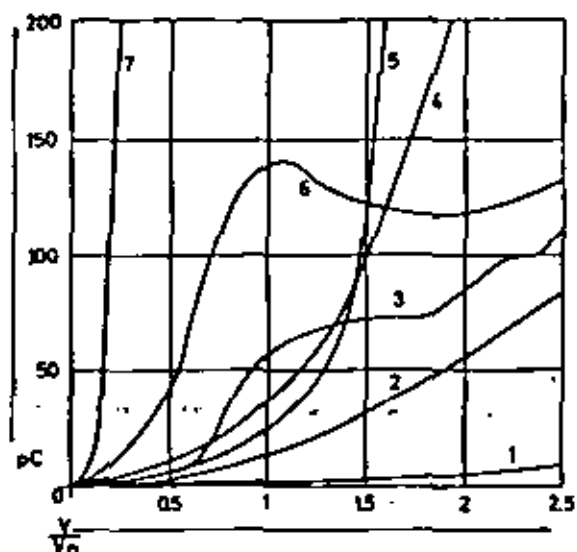


FIG. Nº 26 DESCARGAS EN UNA CAVIDAD ENTRE UNA PARTE CONDUCTORA Y OTRA AISLANTE



- 1: APARATO SIN DESCARGAS
- 2: DESCARGAS DEBILES
- 3: APARICION PROGRESIVA DE NUEVAS DESCARGAS INTERNAS
- 4, 5: DESCARGAS IMPORTANTES POR ENCIMA DE LA TENSION DE SERVICIO
- 6: EFECTO DE SATURACION DEBIDO A CAVIDADES QUE HAN LLEGADO A HACERSE COMPLETAMENTE CONDUCTORAS
- 7: APARATO DEFECTUOSO TENSION DE APARICION MUY BAJA

FIG. Nº 4 CURVAS DE AMPLITUD DE DESCARGAS EN FUNCION DE LA TENSION

nes de aparición y extinción. Sin embargo, debe tenerse en cuenta que en algunos aislamientos las tensiones subsecuentes de aparición y extinción pueden verse afectadas por el tiempo durante el cual se ha mantenido la tensión arriba del valor de aparición. Debe establecerse también si la prueba de descargas debe hacerse antes y/o después de la prueba dieléctrica.

Asegurarse antes de efectuar la prueba que la superficie del aparato está limpia y seca.

### 2.9 Recomendaciones particulares para la prueba de descargas parciales de transformadores para instrumentos.

La prueba de descargas parciales de los transformadores de medición puede tener varios objetivos:

- a) Comprobar que el transformador esté exento de descargas parciales con la tensión usual del circuito.
- b) Comprobar que las pruebas dieléctricas de tensión aplicada e inducida no han causado un daño al transformador, mismo que pudo haber pasado inapercibido durante las pruebas dieléctricas.
- c) Sustitución de las pruebas dieléctricas tradicionales de alta tensión.
- d) Detectar algún cambio en el estado del aislamiento después de que el aparato haya permanecido en servicio durante algún tiempo.

Se ha visto que independientemente de los distintos tipos de instrumentos y de circuitos de prueba utilizados es más fácil demostrar alguno de los puntos anteriores mediante la tensión inicial a la cual aparece la mínima descarga medible que recurrir a mediciones de la amplitud de las descargas a una tensión determinada.

#### 2.9.1. Conexiones de los transformadores.

La capacitancia de los transformadores para instrumento fluctúa entre 100 y 1000 pC. Como es difícil o imposible conseguir un condensador de bloqueo con estos valores, se utiliza el circuito mostrado en la fig. 1b. Si la capacitancia del transformador bajo prueba es pequeña comparada con la capacitancia parásita a tierra, es permisible (1) utilizar un circuito sin condensador de bloqueo o sea con  $C_x = 0$ . Sin embargo, en la práctica se ha visto que un condensador con  $C_x = 50$  pC aumenta considerablemente la sensibilidad, siendo 1:2 aproximadamente la relación. En la figura 5 se muestra una instalación típica para la prueba de descargas hasta una tensión de prueba libre de efecto corona e interferencias de 300 KV. Las conexiones de los devanados de los transformadores de corriente y de potencial para la prueba de descargas parciales se dan en la figura 6a y 6b respectivamente. Los transformadores se colocan sobre una plancha de hule con el objeto de aislar su base de tierra.

#### 2.9.2. Magnitudes de descargas admisibles y tensiones de prueba.

Para garantizar la vida y el buen funcionamiento de un transformador hermético en aceite de alta tensión, es necesario que inmediatamente después de la prueba de potencial aplicado o de tensión inducida, las descargas se mantengan inferiores a 10 pC hasta una tensión superior a la tensión compuesta nominal. Esta tensión debe estar basada en la tensión de protección de los apartarrayos contra transitorios debido a maniobras de conexión y desconexión (Switching surges). Generalmente, esta tensión se sitúa en 1.1 veces la tensión entre fases para apartarrayos del 80% (15).

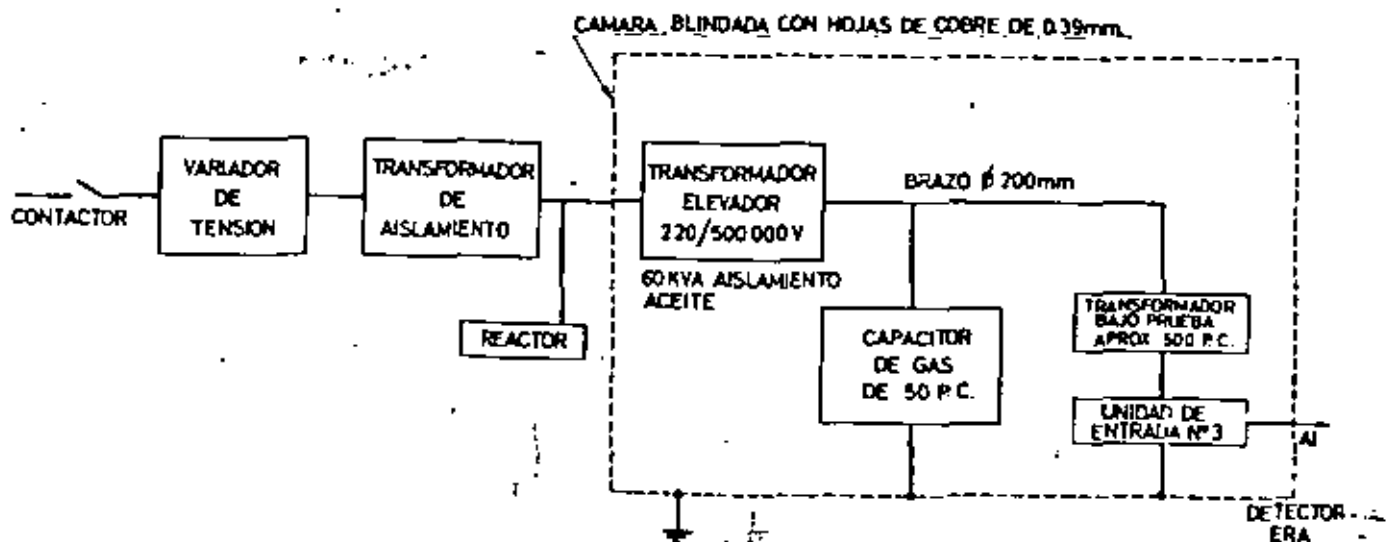


FIG Nº 5 INSTALACION TIPICA PARA LA PRUEBA DE DESCARGA DE TRANSFORMADORES - HASTA 300 KV.

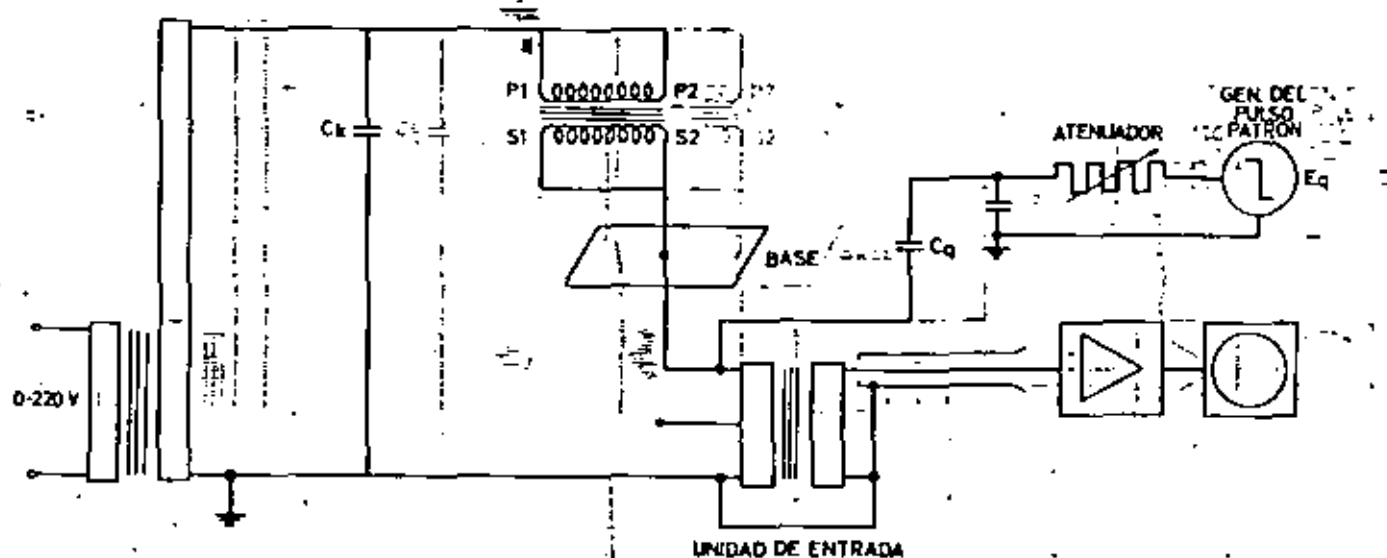


FIG Nº 6a. CONEXIONES DE LAS TERMINALES DE LOS TRANSFORMADORES DE CORRIENTE PARA LA PRUEBA DE DESCARGAS PARCIALES

Los transformadores en resina de 34.5 KV ó más con diferentes magnitudes de descargas están siendo sometidos a pruebas de permanencia con el objeto de establecer los niveles mínimos de descargas y de tensión.

### 3 MEDICION DE LA TANGENTE DELTA

#### 3.1 Definiciones.

##### 3.1.1. Tangente delta.

Es la relación entre la corriente wateada  $I_w$  y la corriente capacitiva  $I_c$  de un material aislante.

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{I_w}{I_c}$$

En un condensador perfecto, la corriente circulante  $I_c$  está adelantada  $90^\circ$  con respecto a la tensión. Si el condensador presenta pérdidas debidas a:

- Corriente superficial o a través del aislamiento al no ser infinita la resistencia.
- Histeresis dieléctrica o sea la resistencia del dieléctrico a ser polarizado.
- Descargas internas.

Habrà una componente resistiva  $I_w$  y la corriente total estará adelantada con respecto a la tensión aplicada un ángulo menor a  $90^\circ$ .

De la Fig. 7 se ve que  $\delta$  es el ángulo de defasamiento entre la corriente total y la corriente puramente capacitiva.

La  $\operatorname{tg} \delta$  también se conoce con el nombre de factor de disipación.

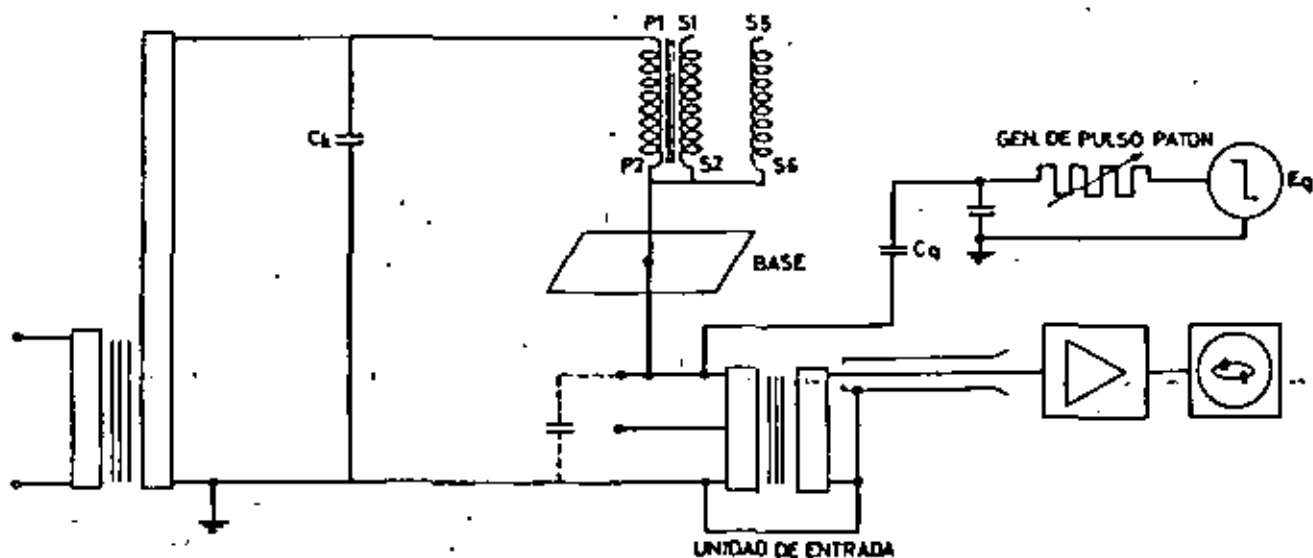


FIG. N° 6b CONEXION DE LAS TERMINALES DE LOS TRANSFOS DE POTENCIAL DE AISLAMIENTO REDUCIDO PARA LA PRUEBA DE DESCARGAS PARCIALES

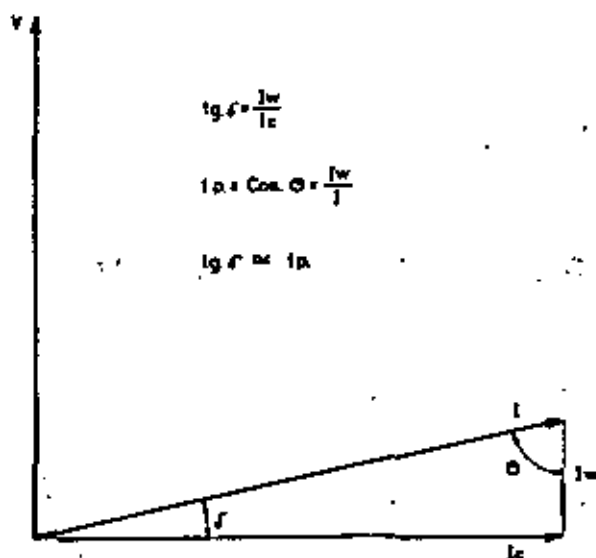


FIG. N° 7

### 3.1.2. Factor de potencia.

Es la relación entre  $I_w$  e  $I$  o sea el coseno del ángulo complementario de  $\theta$ .

$$f.p. = \cos \theta = \frac{I_w}{I}$$

Generalmente, este factor se determina indicando la potencia disipada (en watts) y la potencia de carga del dieléctrico (en VA), entonces

$$f.p. = \frac{VI_w}{VI} = \frac{\text{Watts}}{\text{VA}}$$

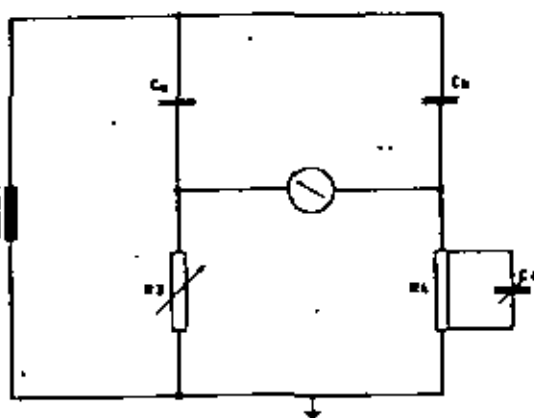


FIG. N° 8 PUENTE DE SHERING

- Generalmente la  $tg \delta$  y el  $f.p.$  se expresan en por ciento.

Para valores pequeños de

$$tg \delta \approx f.p.$$

### 3.2. Instrumento de medición.

El método clásico de medición es el puente de Shering (Fig. 8). En este se compara la capacitancia del objeto bajo prueba  $C_x$  con un condensador patrón  $C_p$  que prácticamente no tiene pérdidas.

En equilibrio tendremos:

$$C_x = C_p \frac{R_2}{R_1}$$

$$tg \delta = 2\pi f (R_1 C_1 - R_2 C_2)$$

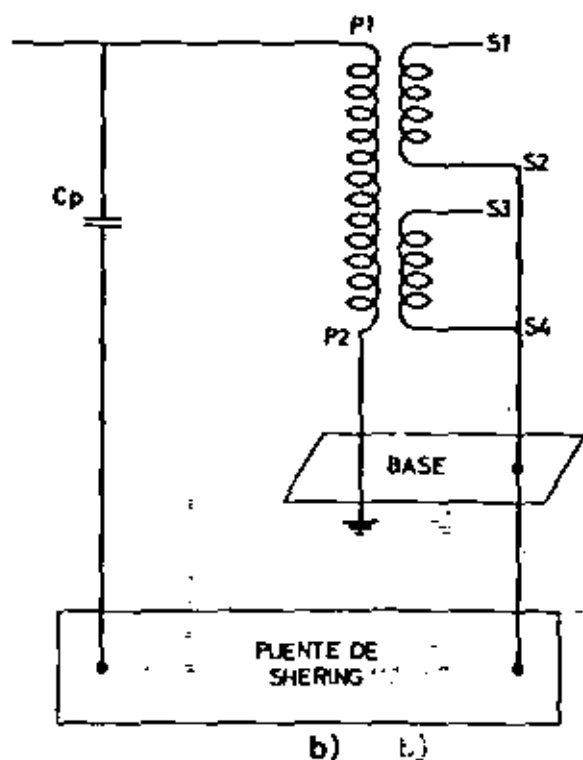
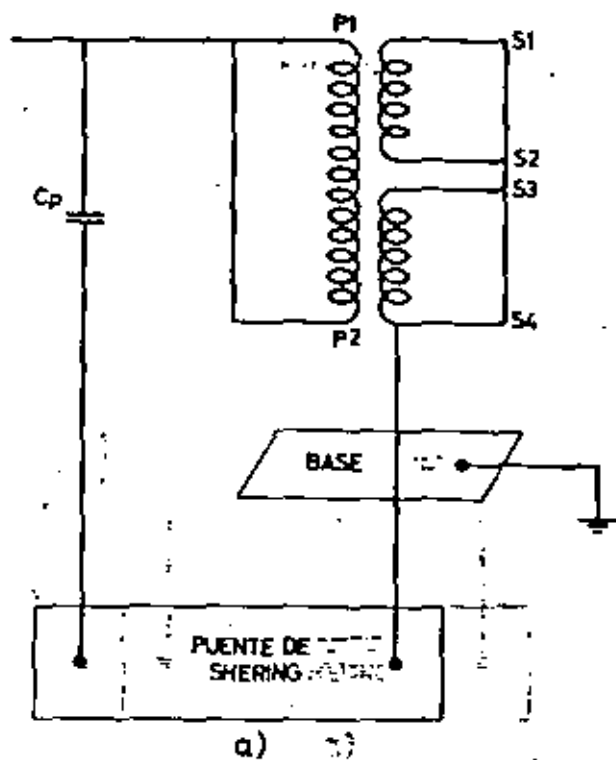


FIG. N.º 9 CONEXIONES DE LAS TERMINALES DE LOS TRANSFORMADORES PARA LA PRUEBA DE  $tg \delta$

3.3. Circuitos de prueba y discusión.

La conexión que generalmente se emplea en los transformadores de corriente y de potencial es poniendo todos los devanados en corto circuito. (Fig. 9a). Sin embargo, como se verá más adelante, para los transformadores de potencial de aislamiento reducido se recomienda hacer las conexiones mostradas en la fig. 9b.

Cuando se efectúan pruebas de  $tg \delta$  sobre un aparato completo es recomendable trazar un esquema equivalente con todas las capacitancias que puedan intervenir en la medición, ya que en muchas configuraciones interviene el campo eléctrico externo influido por objetos colocados cerca del aparato bajo prueba, las capacitancias a tierra, el material entre terminales, etc., y cuyo efecto puede ser mayor al del propio dieléctrico.

En los transformadores de corriente, valores superiores a 0.6% indican presencia de humedad o un envejecimiento del aislamiento. En los transformadores de potencial con aislamiento reducido, por el contrario, el factor de potencia medido entre los devanados de alta y baja tensión (Según la fig. 9a) no es representativo de la calidad ya que en servicio normal la terminal P<sub>2</sub> siempre se conecta directamente a tierra y no existe tensión aplicada entre dichos devanados. De hecho, se mide el factor de potencia entre el devanado de alta y el de baja, incluyendo las pérdidas entre las terminales y este factor de potencia no depende del aislamiento entre espiras ni entre capas. Mediante el circuito de la fig. 9b es posible medir el factor de potencia en las mismas condiciones en las que operará el transformador (Con tensión nominal).

Se obtiene así resultados más representativos, como lo demuestran la siguiente tabla.

| Aparato | Conexión | KV  | $tg \delta$ (%) | $C_g$ (pF) |
|---------|----------|-----|-----------------|------------|
| 1       | Fig. 9a  | 30  | 4.59            | 5.610      |
| 1       | 9b       | 30  | 1.341           |            |
| Aparato | Conexión | KV  | $tg \delta$ (%) | $C_g$ (pF) |
| 1       | Fig. 9b  | 132 | 1.360           | 20.2       |
| 2       | 9a       | 3   | 1.584           | 588        |
| 2       | 9b       | 30  | 0.747           |            |
| 2       | 9b       | 132 | 0.755           | 20.0       |

4. RELACION ENTRE LAS PRUEBAS DE DESCARGAS PARCIALES Y DE  $tg \delta$ .

Para verificar la calidad de un dieléctrico no debe considerarse únicamente un determinado valor de  $tg \delta$ , sino sobre todo, su variación en función de la tensión aplicada, del tiempo y de la temperatura.

Un aumento brusco en el valor del factor de potencia generalmente se atribuye a la aparición de descargas parciales pero puede deberse también a pérdidas iónicas y dipolares. Es difícil distinguir una de la otra a menos de tener a disposición un detector de descargas. En la fig. 10 se muestran 2 curvas características de la variación de la  $tg \delta$  al aumentar la tensión la interpretación de dichas curvas es la siguiente:

La fig. 10 a, representa un aislamiento en buenas condiciones (Se aprecia un ligero aumento en la  $tg \delta$  y en el incremento de la capacitancia a la tensión de prueba). Se obtiene la misma curva en la bajada de tensión. La fig. 10b, representa un transformador en aceite

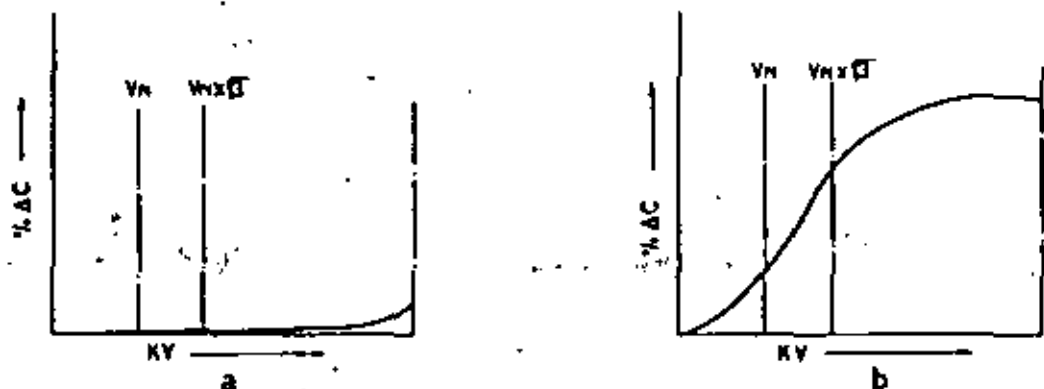
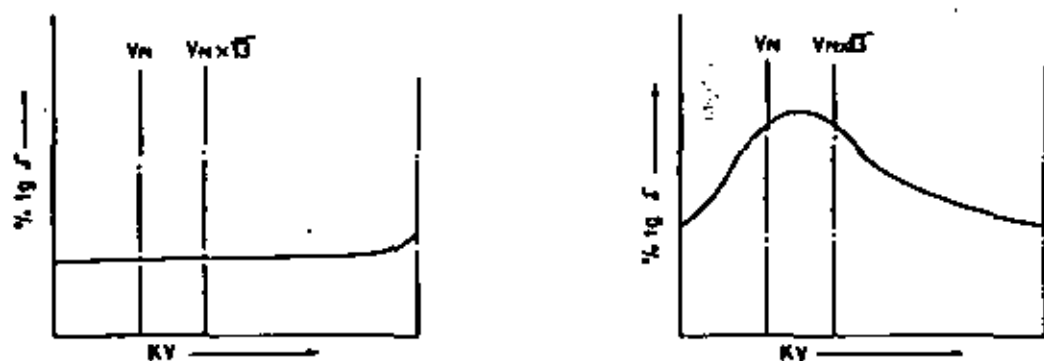


FIG N° 10 CURVAS CARACTERISTICAS DE  $\text{tg } \delta - KV$

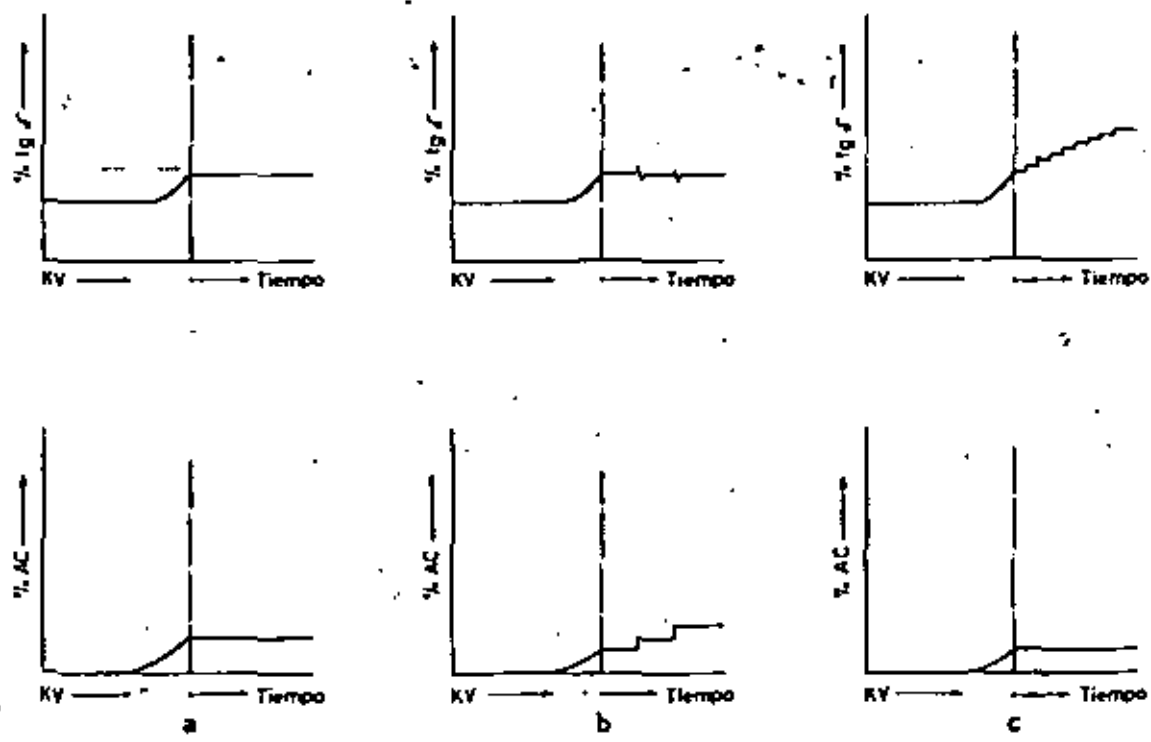


FIG N° 11 CURVAS CARACTERISTICAS DE  $\text{tg } \delta - \text{Tiempo}$

con burbujas de aire o con pequeños poros entre capas del devanado. A una determinada tensión se producen pequeñas descargas, pero al seguir aumentando la tensión las burbujas o los poros se ponen completamente en corto trayendo como consecuencia una disminución en la  $tg \delta$ . La curva de capacitancia aumenta progresivamente hasta llegar al valor característico del material.

En la fig. 11, se dan algunas curvas de la variación de la  $tg \delta$  y capacitancia con el tiempo.

La fig. 11a, representa un caso normal.

La fig. 11b, se van poniendo en corto distintas capas del dieléctrico por lo que únicamente aumenta  $C$  y no la  $tg \delta$ .

En la g. 11c, aumenta la  $tg \delta$  debido al calor desarrollado por las pérdidas.

En el trabajo de la referencia 2 se demostró que la mínima descarga detectable para un objeto bajo prueba con capacitancia de 1000 pF es de 50 pC, por lo que resulta muy insensible la prueba de  $tg \delta$  para la detección de descargas.

#### REFERENCIAS

1. Recomendación del CEI No. 270 "Medida de Descargas Parciales".
2. Ing. A. Cárdenas L., "La Importancia de las Descargas Parciales en Equipo de Alta Tensión". Ponencia presentada en el VI Seminario del I.E.E.E. Sección México.
3. Dakin, Works y Miller, "Utilization of Peak-Reading Voltmeters and Records for Corona Measurement", I.E.E.E. Trans. Electrical Insulation, Vol. EI-2, No. 2, August 1967.
4. Bartnikas y Levi, "A Simple Pulse-Height Analyser for Partial Discharge Rate Measurements", I.E.E.E. Trans. Electrical Insulation, Vol. IM-18, No. 4, Dec. 1969.
5. NEMA, "Methods of Measurement of Radio Influence Voltage of Apparatus" Publicación No. 107 - 1964.
6. Publicación No. 1A del CISPR (Comité Internacional Especial de Perturbaciones Radiofónicas).
7. S. Yanabu, M. Honda y M. Ikeda, "Corona Test on High Voltage Apparatus" Reporte de la Tokyo Shibaura Electric Co. Yokohama, Japón.
8. E. M. Dembinski, J. L. Douglas, "Calibration and Comparison of Partial-Discharge and Radio-Interference Measuring Circuits" Proc. I.E.E.E. Vol. 115 No. 9, Sept. 1968.
9. Morrison, "Grounding and Shielding Techniques in Instrumentation", J. Wiley.
10. Carpenter, Kiesge y Musick, "Ultrasonic Corona Detection in Transformers" I.E.E.E. Trans. on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-84 No. 8, August 1965.
11. Boyles y Hinton, "Seven Years of Corona Testing" I.E.E.E. Conference paper No. 70 CP120 - PWR.
12. Kreuger, "Discharge Detection in High Voltage Equipment", Ed. American Elsevier Publication Co.
13. J. A. Mason, "Discharge Detection and Measurements" Proc. I.E.E.E. Vol. 112 No. 7, July 1965.
14. C. Mole y Parroti, "Localización of Discharge Cavity in 33 KV Metalclad Busbar by the Use of X Rays" Proc. I.E.E.E., Vol. 114, No. 10, Oct. 1967.
15. L. C. Aicher, "A Transformer Corona Test Based on Switching Overvoltages", I.E.E.E. Conference paper No. 70 CP-121-PWR.
16. Libro: "Messung und Prüfung an Wandlern".



NOM-J-335-1978

CAT. 3  
Ago. 1978

①

COMITÉ CONSULTIVO NACIONAL DE NORMALIZACIÓN  
DE LA INDUSTRIA ELECTRICA

MEDICION DE DESCARGAS PARCIALES

MEXICO

Marlono Escobedo 724-4a. Piso  
México 5, D.F.

PREFACIO

Esta Norma ha sido elaborada por el Subcomité CAT.3 "Descargas Parciales", del Comité Consultivo Nacional de Normalización de la Industria Eléctrica. Dicho Subcomité se encuentra integrado por los siguientes Organismos, representados por las personas que se indican:

|                                          |                                                                                                          |
|------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| COMISION FEDERAL DE ELECTRICIDAD         | Ing. Carlos L. Cabrera R.                                                                                |
| CONELC, S.A.                             | Ing. Jaime Martínez Pérez                                                                                |
| CONDUCTORES MONTERREY, S.A.              | Ing. Condalarlo Saldívar Cantú                                                                           |
| CONDUMEX, S.A.                           | Ing. José Luis Nieto S.<br>Ing. Rafael Torres R.                                                         |
| ELECTROTECNICA BALTEAU, S.A.             | Ing. Lorenzo G. Julien P.                                                                                |
| GENERAL ELECTRIC DE MEXICO, S.A.         | Ing. Alberto Ortiz Alvarez                                                                               |
| INDUSTRIAL DE AISLANTES ELECTRICOS, S.A. | Ing. José Velaz Nieto                                                                                    |
| INDUSTRIAL ELECTRICA, S.A.               | Ing. Ramón Rodríguez A.                                                                                  |
| INDUSTRIAS IEM, S.A. DE C.V.             | Ing. Antonio Alvarez T.                                                                                  |
| INSTITUTO DE INVESTIGACIONES ELECTRICAS  | Ing. Marco Antonio Manroy B.                                                                             |
| PRODUCTOS INDUSTRIALES CM, S.A.          | Ing. Alejandro Morales R.<br>Ing. Georg K. Krauss<br>Ing. José Luis Ontiveros V.<br>Ing. Sergio González |
| OFICINA TECNICA CONNIE                   | Ing. J. Jesús Escamilla Hurtado                                                                          |



## CONTENIDO

|                                                                                        | Pág. |
|----------------------------------------------------------------------------------------|------|
| 1. OBJETIVO .....                                                                      | 1    |
| 2. CAMPO DE APLICACION .....                                                           | 1    |
| 3. REFERENCIAS .....                                                                   | 2    |
| 4. DEFINICIONES .....                                                                  | 2    |
| 4.1 Descarga Parcial .....                                                             | 2    |
| 4.2 Intensidad de Descarga Parcial .....                                               | 3    |
| 4.3 Magnitudes Relacionadas a Descargas Individuales .....                             | 3    |
| 4.4 Cantidades Integradas .....                                                        | 4    |
| 4.5 Valores de Tensión Relacionados con las Descargas Parciales .....                  | 6    |
| 5. CIRCUITOS DE PRUEBA E INSTRUMENTOS DE MEDICION .....                                | 6    |
| 5.1 Requisitos Generales .....                                                         | 6    |
| 5.2 Circuitos de Prueba .....                                                          | 7    |
| 5.3 Instrumentos de Medición .....                                                     | 8    |
| 5.4 Métodos de Detección no Eléctricos .....                                           | 10   |
| 6. CALIBRACION Y CONTROL .....                                                         | 11   |
| 6.1 Generalidades .....                                                                | 11   |
| 6.2 Características del Instrumento de Medición .....                                  | 11   |
| 6.3 Calibración del Instrumento Insertado en el Circuito de Prueba Comple-<br>to ..... | 13   |
| 6.4 Perturbaciones .....                                                               | 13   |
| 7. METODOS DE PRUEBAS .....                                                            | 16   |
| 7.1 Requisitos Generales .....                                                         | 16   |
| 7.2 Acondicionamiento del Objeto Bajo Prueba .....                                     | 16   |
| 7.3 Requerimiento para la Tensión de Prueba .....                                      | 17   |
| 7.4 Elección del Procedimiento de Prueba .....                                         | 17   |
| 7.5 Mediciones en Objetos Bajo Prueba con Devanados .....                              | 19   |
| 8. BIBLIOGRAFIA .....                                                                  | 19   |
| APENDICE A - CIRCUITOS DE PRUEBAS .....                                                | 20   |
| APENDICE B - RESUMEN DE INSTRUMENTOS DE MEDICION Y METO-<br>DOS .....                  | 22   |

|                                                                                                              | Pág. |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| APENDICE C - MEDICIONES SOBRE OBJETOS BAJO PRUEBA CON DE-<br>VANADOS Y SOBRE CABLES .....                    | 24   |
| APENDICE D - USO DE MEDIDORES DE RADIO INTERFERENCIA PARA -<br>MEDICION DE DESCARGAS PARCIALES .....         | 25   |
| APENDICE E - CANTIDADES MINIMAS MEDIBLES .....                                                               | 27   |
| APENDICE F - NOTA TECNICA 1.- Métodos para Medir la Potencia de<br>Descargas Parciales .....                 | 29   |
| APENDICE G - NOTA TECNICA 2.- Fuente de Resistencia de Pulsos de<br>Descargas por Efecto Corona .....        | 31   |
| APENDICE H - NOTA TECNICA 3.- Medición de Descargas Parciales -<br>Durante Pruebas con Tensión en C. D. .... | 32   |

## MEDICIÓN DE DESCARGAS PARCIALES

### 1. OBJETIVO

Los objetivos de esta Norma son:

- Definir los términos usados
- Definir las cantidades relevantes para medición
- Describir los circuitos de prueba e instrumentos de medición que puedan utilizarse
- Establecer los tipos de medición e instrumentos adecuados para aplicaciones particulares
- Establecer métodos para calibración y comprobación
- Describir procedimientos de prueba

### 2. CAMPO DE APLICACIÓN

Esta Norma es aplicable a la medición de descargas parciales durante pruebas con tensión alterna únicamente. La medición de descargas parciales durante pruebas con tensión directa son tratadas brevemente en una Nota Técnica.

El propósito principal de esta Norma es que sirva de referencia para elaborar normas y especificaciones para aparatos específicos.

La medición de descargas parciales se efectúa con los siguientes propósitos principales:

- Verificar que el objeto de prueba esté libre de descargas parciales superiores a una magnitud especificada, a una tensión especificada.
- Determinar las amplitudes de tensión a las cuales las descargas parciales se inician con tensión creciente, y cesan con tensión decreciente.
- Determinar la intensidad de descarga a una tensión específica.

Las descargas consideradas en esta Norma son descargas eléctricas localizadas en un medio aislante, restringidas a solamente una parte del dieléctrico bajo prueba, y que puentean sólo parcialmente al aislamiento entre conductores. Pueden resultar de ionización en cavidades dentro de aislamientos sólidos, en burbujas de gases en aislamientos líquidos, o sobre superficies dieléctricas.

Cada descarga individual en una sola cavidad produce un pulso simple de corriente en el dieléctrico y en el circuito externo.

Aún cuando sólo involucren pequeñas cantidades de energía, las descargas parciales pueden conducir a un deterioro progresivo de las propiedades dieléctricas de los materiales aislantes; sin embargo, la determinación y evaluación de tal deterioro, queda fuera del alcance de esta Norma.

Las mediciones de descargas parciales en aparatos que tengan bobinas, como transformadores, generadores y motores, son complicadas debido a la atenuación de pulsos en las bobinas, y por el fenómeno de resonancia. Solamente se tratan, en forma breve, los requisitos especiales para pruebas en estos equipos.

Esta Norma trata principalmente con mediciones eléctricas de las descargas parciales, aunque se hace referencia a métodos no eléctricos.

### 3. REFERENCIAS

Esta Norma se complementa con la siguiente Norma Oficial Mexicana en vigor.

NOM-027) Técnicas de Prueba en Alta Tensión.  
(CONNIE CAT.5-1)

### 4. DEFINICIONES

#### 4.1 Descarga Parcial

Una descarga parcial, dentro de los límites de esta Norma, es un tipo de descarga localizada en una porción de un sistema aislante entre dos partes conductoras, resultante de una ionización gaseosa transitoria, cuando el gradiente de tensión excede de un valor crítico. Estas descargas pueden ocurrir en zonas adyacentes o no adyacentes a las partes conductoras.

NOTA: El término "corona" se reserva preferentemente a descargas parciales en gases alrededor de un conductor, desnudo o aislado, alejado de - - -

cualquier otro aislamiento sólido. También se utiliza en algunos países, para designar todos los tipos de descargas parciales tratadas en esta Norma, sin embargo, su uso debe limitarse a lo indicado antes en esta nota y no hacerla extensiva.

El término "ionización" describe a cualquier proceso que produzca iones positivos o negativos, o electrones, a partir de átomos o moléculas neutros y no debe usarse para designar descargas parciales.

#### 4.2 Intensidad de Descarga Parcial

La magnitud de descarga parcial que ocurre en cualquier objeto bajo prueba en determinadas condiciones puede ser descrita, en unidades no especificadas, por el término general "intensidad de descarga". Los resultados cuantitativos de las mediciones se expresan en términos de uno o más de las cantidades especificadas que se definen en 4.3 y 4.4. Para información sobre la selección de cantidad o cantidades, véase el capítulo 7.

#### 4.3 Magnitudes Relacionadas a Descargas Individuales

##### 4.3.1 Carga Aparente "q"

La carga aparente "q" de una descarga parcial es aquella carga que, si se inyecta instantáneamente entre los terminales del objeto bajo prueba, cambiaría momentáneamente la tensión entre sus terminales en la misma cantidad que la descarga parcial misma.

El valor absoluto |q| de la carga aparente es a veces referido como la magnitud de descarga. La carga aparente se expresa en coulombs.

NOTA: La carga aparente "q" así definida no es igual a la cantidad de carga real transferida a través de la cavidad de descarga en el dieléctrico. Se utiliza debido a que los instrumentos medidores de descargas responden a esta cantidad.

##### 4.3.2 Frecuencia de Repetición "n"

Es el número promedio de pulsos de descargas parciales por segundo.

NOTA: En la práctica, solamente se consideran los pulsos que son mayores de una magnitud especificada, o dentro de un rango específico. Los resultados a veces se expresan mediante curvas de distribución de frecuencia acumulativa de magnitudes de descargas parciales.

##### 4.3.3 Energía "W" de una Descarga Parcial Individual

Es la energía disipada durante una descarga individual y se expresa en joules.

NOTA: Bajo ciertas suposiciones relacionadas a la representación eléctrica del fenómeno físico, esta energía viene dada en términos de "q" y "V", por la expresión:

$$W = \frac{\sqrt{2}}{2} q V$$

donde:

"q" Es la carga aparente medida.

"V" Es el valor correspondiente a la tensión de iniciación. (Para la definición de tensión de iniciación, véase 4.5 y 4.5.1).

#### 4.4 Cantidades Integradas

De las unidades básicas, "q" y "n"; pueden definirse otras cantidades, caracterizadas por adiciones durante un intervalo de tiempo, "T". Este intervalo de tiempo debe ser largo comparado con la duración de un ciclo de la tensión aplicada al objeto de prueba.

##### 4.4.1 Corriente de Descarga Promedio "I"

La corriente de descarga promedio "I", es la suma de las cantidades rectificadas de carga debido a las descargas parciales que pasan a través de los terminales del objeto bajo prueba, durante un cierto intervalo de tiempo "T", dividido entre este intervalo de tiempo:

$$I = \frac{1}{T} (|q_1| + |q_2| + |q_3| + \dots + |q_m|)$$

Si todos los descargas son de la misma magnitud,  $|q|$ , el valor de  $I$ , se simplifica a lo siguiente:

$$I = n |q|$$

La descarga promedio se expresa en coulomb/segundo (ampere).

#### 4.4.2 Razón Cuadrática "D"

La razón cuadrática "D" es la suma de los cuadrados de los cargos debida a los descargas parciales que pasan a través de las terminales del objeto bajo prueba, durante un cierto intervalo de tiempo "T", dividido entre este intervalo de tiempo:

$$D = \frac{1}{T} \left( q_1^2 + q_2^2 + q_3^2 + \dots + q_m^2 \right)$$

Si todos los descargas son de igual magnitud  $|q|$ , el valor de D se simplifica a lo siguiente:

$$D = n q^2$$

La razón cuadrática se expresa en (coulombs)<sup>2</sup>/segundo

#### 4.4.3 Potencia de la Descarga "P"

La potencia de la descarga "P", es la potencia promedio en las terminales del objeto bajo prueba debida a descargas parciales, durante un cierto intervalo de tiempo "T".

Viene dado por la siguiente expresión:

$$P = \frac{1}{T} \left( q_1 V_1 + q_2 V_2 + q_3 V_3 + \dots + q_m V_m \right)$$

donde:  
 $V_1, V_2, V_3, \dots, V_m$ , son los valores instantáneos de tensión a través del objeto bajo prueba en los instantes de las descargas  $q_1, q_2, q_3, \dots, q_m$ .

La potencia promedio de los descargas se expresa en watts.

### 4.5 Valores de Tensión Relacionados con los Descargas Parciales

Los valores de tensión durante las pruebas de descargas parciales vienen generalmente dados por su valor de cresta dividido entre  $\sqrt{2}$ ; de acuerdo con la Norma Oficial Mexicana NOM-1-271 en vigor. Los siguientes valores son de particular interés.

#### 4.5.1 Tensión de Iniciación de Descargas Parciales "Vi"

La tensión de iniciación de descargas parciales  $V_i$ , es la menor tensión a la cual se observan descargas parciales que excedan a una intensidad especificada, bajo condiciones también especificadas (véase 7.4), cuando la tensión aplicada al objeto bajo prueba se aumenta gradualmente desde un valor inferior en el cual no se observan tales descargas.

#### 4.5.2 Tensión de Extinción de Descargas Parciales "Va"

La tensión de extinción de los descargas parciales "Va", es la tensión a la cual cesan los descargas parciales que excedan una intensidad especificada, bajo condiciones también especificadas (véase 7.4), cuando la tensión se hace disminuir gradualmente desde un valor que exceda a la tensión de iniciación.

#### 4.5.3 Tensión de Prueba Libre de Descargas Parciales

La tensión de prueba libre de descargas parciales es una tensión aplicada y con un procedimiento de prueba especificados, a la cual el objeto de prueba debe estar libre de descargas parciales que excedan una intensidad especificada (véase 7.4).

## 5. CIRCUITOS DE PRUEBA E INSTRUMENTOS DE MEDICION

### 5.1 Requisitos Generales

En este capítulo, se describen brevemente varios tipos de circuitos de prueba e instrumentos para la medición de los descargas parciales.

Cualesquiera que sean los tipos de circuitos de prueba y los instrumentos de medición usados, se deben verificar y calibrar como se especifica en 6.1 a 6.3.2, y deben cumplir con los requisitos para una intensidad mínima medible especificada por la Norma correspondiente (véase 7.1).

Si no se especifica de otra forma por la Norma correspondiente, se aceptan cualesquiera de los circuitos de prueba mencionados en 5.2, y cualesquiera de los instrumentos mencionados en 5.3.

Generalmente se acepta cualquier instrumento que mida los valores ya mencionados, conectado a cualquier circuito de medición. Sin embargo, la Norma puede sugerir la selección de instrumentos que midan uno o más valores particulares. La Norma, asimismo, puede por razones técnicas particulares, considerar necesario indicar con más detalle el uso de un tipo específico de instrumento de medida o circuito de prueba o fijar requisitos particulares que no estén cubiertos en esta Norma.

Los métodos no eléctricos para la detección de descargas parciales, no se recomiendan para mediciones cuantitativas, pero son útiles para propósitos especiales. La información está dada en 5.4.

### 5.2 Circuitos de Prueba

La mayoría de los circuitos en uso para pruebas de descargas parciales, pueden ser derivadas de uno u otro de los tres circuitos básicos que se muestran en las figuras 1a, 1b y 1c; algunas variaciones de estos circuitos se muestran en las figuras 2 y 3. Cada uno de estos circuitos consiste principalmente de:

- Un objeto bajo prueba, el cual en muchos casos puede considerarse como un capacitor,  $C_0$  (véase Apéndice C).
- Un capacitor de acoplamiento,  $C_1$  (o un segundo objeto bajo prueba  $C_{01}$ ).
- Una impedancia de medición  $Z_m$  (y algunos veces una segunda impedancia  $Z_{m1}$ ).
- Un instrumento de medición.
- Algunos veces una impedancia o filtro  $Z$ , para evitar pulsos de descarga que hayan pasado a través de la fuente de alta tensión y para reducir la interferencia de la fuente.

El capacitor de acoplamiento debe estar libre de descargas hasta el valor más alto de la tensión de prueba. En algunos casos, especialmente si se necesita un capacitor de acoplamiento grande, o en un circuito balanceado, se utiliza un segundo objeto bajo prueba en lugar del capacitor de acoplamiento.

La impedancia de medición, generalmente consiste de una resistencia o un circuito sintonizado amortiguado. Usualmente actúa éste como una impedancia de cuatro -

terminales. Esta impedancia en combinación con el objeto bajo prueba y el capacitor de acoplamiento, determina la duración y forma de los pulsos medidos. La impedancia de medición puede diseñarse también para impedir que los componentes de frecuencia de la fuente, alcancen al instrumento de medición.

Las descargas parciales en el objeto bajo prueba causan transferencia de carga en el circuito, causando un incremento en los pulsos de corriente, a través de la impedancia de medición. Los pulsos de tensión resultantes son amplificadas y mostrados en el instrumento de medición.

Las características particulares de los diferentes arreglos de los circuitos, están considerados en el Apéndice A.

### 5.3 Instrumentos de Medición

Los instrumentos disponibles para la medición de descargas parciales pueden ser clasificados en varias formas. En los incisos 5.3.1 a 5.3.6, están resumidas sus principales características de acuerdo con las cantidades a medir (definidas en 4.3 y 4.4). Para especificaciones completas respecto a los instrumentos, referirse a la literatura particular.

Cuando el instrumento de medición pueda dar cualesquier otra forma de indicación, se recomienda un oscilograma, para distinguir entre los diferentes tipos de descargas parciales, así como entre las descargas medidas y los disturbios ajenos (véase 6.4.2). En el Apéndice B se resume una lista de métodos e instrumentos de medición.

#### 5.3.1 Instrumentos para la Medición de Descargas Individuales

En un osciloscopia se pueden mostrar los pulsos individuales debidos a descargas que tengan valores de cresta proporcionales a los correspondientes cantidades de descarga "q", usando una base de tiempo rotatoria sincronizada con la tensión de prueba o una base de tiempo lineal activado, por ejemplo, con el pulso de descarga.

La magnitud  $|q|$  de la mayor descarga durante cualquier intervalo corto, (del orden de unos pocos ciclos de la tensión de prueba), puede medirse alternativamente con un medidor de picos de descarga con una escala calibrada en picocoulombs.

La distribución de las frecuencias de repetición (n) con respecto a las magnitudes de los pulsos pueda determinarse usando contadores de pulsos (véase 5.3.2).

Para mediciones crecientes a la tensión de iniciación (cuando están involucradas sólo unas pocas descargas por ciclo), el tiempo de resolución del instrumento o la constante de tiempo del voltmetro de crestas son aceptables si no se producen errores en la medición de la amplitud debido al traslape de pulsos cuando éstos están separados cuando menos por 100  $\mu$ s. Sin embargo, son convenientes tiempos de resolución más cortos que pueden obtenerse con instrumentos disponibles.

### 5.3.2 Instrumentos para Medición de la Frecuencia de Repetición de Pulsos

Para medir la frecuencia de repetición ( $n$ ) puede usarse cualquier clase de contadores de pulso o medidores de frecuencia (indicando ya sea el número total de pulsos en un tiempo dado o el número promedio por segundo). Usualmente, esos medidores tienen incorporado un discriminador de magnitudes, el cual suprime pulsos menores al de una magnitud previamente ajustada.

Si los pulsos que llegan a los terminales del contador son oscilatorios, debe tenerse precaución para evitar obtener más de una lectura por pulso.

**NOTA:** Para algunos propósitos puede ser útil, si el discriminador acepta pulsos entre los límites alto y bajo de una magnitud preajustada.

### 5.3.3 Instrumentos para la Medición de la Corriente de Descarga Promedio

Se recomienda en principio el uso de un instrumento que mida el valor promedio de los pulsos de descarga, después de una rectificación y amplificación lineal, y que, calibrada adecuadamente indique la corriente de descarga promedio,  $i$ , como está definido en 4.4.1. Se deben tomar precauciones para evitar errores no detectables ya sea por la sobrecarga del amplificador cuando se tengan frecuencias de repetición,  $n$ , de valores pequeños, o por superposiciones de pulsos oscilatorios cuando " $n$ " presente valores grandes.

### 5.3.4 Instrumentos para la Medición de la Razón Cuadrática

Se recomienda el uso de un instrumento que mida el valor medio cuadrático de las magnitudes de descargas por segundo, el cual indique la razón cuadrática  $D$ , como se define en 4.4.2. Se puede hacer la medición, haciendo pasar los pulsos amplificados a través de un rectificador que dé una respuesta de forma cuadrática y derivando la componente de C.D., medio resultante; o alternativamente, se puede hacer pasando los pulsos desde un amplificador lineal hasta un detector térmico. Se requieren consideraciones especiales para las características de sobrecarga del instrumento.

### 5.3.5 Arreglos para la Medición de la Potencia de Descarga

En la Nota Técnica 1 (Apéndice F), se describen brevemente dos métodos para la medición de la potencia de descarga. Estos son el método de trazo de circuito cerrado y el método del puente de Schering modificada; ambos emplean circuitos tipo puente, balanceándose para la frecuencia de prueba. Estos son útiles principalmente para probar objetos que tienen una intensidad de descargas relativamente alta; para ciertos propósitos, algunos de estos métodos pueden ser poco sensibles.

**NOTA:** Se ha propuesto el uso de un wattímetro convencional, siendo alimentados sus dos bobinas con corriente proporcional a los pulsos de corriente de descarga y al valor instantáneo de la tensión de prueba. Esto puede involucrar dificultades, dado que cualquier filtro usado para rechazar la frecuencia de prueba, suprime también la componente de esa frecuencia de prueba en el pulso de descarga, lo cual es esencial para la medición.

### 5.3.6 Uso de Medidores de Radio Interferencia para la Medición de Descargas Parciales

Algunas veces se usan medidores de radio interferencia convencionales; en adición a los instrumentos descritos con anterioridad, para la medición de descargas parciales. En el Apéndice D, se da información sobre las unidades de medición que dan estos medidores y sobre la evaluación de las lecturas cuando se usan para medir descargas parciales.

## 5.4 Métodos de Detección no Eléctricos

En seguida se comentan brevemente los métodos no-eléctricos para la detección de descargas parciales. Estos incluyen métodos ópticos y acústicos y también cuando es practicable, la subsecuente observación de los efectos de cualquier descarga en el objeto bajo prueba.

### 5.4.1 Detección Acústica

Para la localización de descargas se han encontrado útiles las detecciones acústicas objetivas, hechas en un cuarto con bajo nivel de ruido, usualmente efectuadas con micrófonos u otros transductores y oscilógrafos. Para la localización de descargas de corona en aire son útiles los micrófonos direccionales selectivos con una alta sensibilidad sobre el rango de frecuencias audibles. Para la localización de descargas en equipo sumergido en líquidos aislantes, por ejemplo transformadores,

también se utilizan los transductores piezo eléctricos con oscilógrafos; los cuales pueden colocarse dentro o fuera del tanque.

### 5.4.2 Detección Óptica

Se pueden efectuar observaciones visuales en un cuarto oscuro, una vez que los ojos se han adaptado a la oscuridad y de ser necesaria, se utilizan prismáticos de gran apertura. Alternativamente, se pueden tomar fotografías, pero para esta es necesario un tiempo de exposición largo. Para propósitos especiales se utilizan a veces fotomultiplicadores.

### 5.4.3 Observaciones de las Huellas de Deterioro

Cuando es posible efectuar una inspección posterior, los marcas de deterioro que han sido dejadas por los descargas, pueden dar una información útil para determinar la localización y la extensión de éstas.

## 6. CALIBRACION Y CONTROL

### 6.1 Generalidades

La calibración y el control comprenden dos operaciones distintas; una consiste en una determinación completa de las características del instrumento mismo de medida; incluyendo una calibración completa; y la otra de una calibración de rutina del instrumento en el circuito de prueba completo. Esta última calibración, debe comprender una verificación de que el instrumento, tal como es utilizada en el circuito de prueba, es capaz de detectar la intensidad de descargas mínimas especificadas por el Comité de Estudios Interesada (véase 7.1).

En los párrafos 6.2 y 6.3 se describen algunos métodos de calibración y control; pudiéndose utilizar otros métodos, si se demuestra su validez.

### 6.2 Características del Instrumento de Medición

La determinación completa de las características, deben ser hechas para toda la gama de mediciones y en todas las condiciones de utilización previstas. Deben ser determinados el tiempo de respuesta, la resolución de los pulsos, la regularidad del factor de escala y la estabilidad de todo dispositivo de calibración incorporada,

etc. La impedancia de medición,  $Z_m$  y el cable de conexión forman parte integral del instrumento y deben ser incluidos en la calibración.

La determinación de las características del instrumento debe, en general, comprender la verificación de la exactitud de la respuesta para pulsos que se vayan incrementando en magnitud, pero sin llegar a sobrecargar el instrumento, así como la determinación del tiempo de resolución de los pulsos.

La primera de estas operaciones, debe ser hecha a una baja frecuencia de repetición (de preferencia, alrededor de 100 por segundo), para poder detectar limitaciones debidas a pulsos de sobrecargas en el amplificador.

El tiempo de resolución, puede ser determinado por medio de pulsos de magnitud constante y de frecuencia de repetición creciente; y esto puede depender de las condiciones del circuito de prueba que influye sobre la forma de los pulsos.

La calibración del instrumento, debe repetirse periódicamente, total o parcialmente, según lo indique la experiencia.

#### 6.2.1 Calibración de los Instrumentos para Medir la Carga Aparente, $q$

La calibración de un instrumento para la medición de la carga aparente,  $q$ , de descargas paralelas simples, se realiza haciendo pasar pequeños pulsos de corriente, de carga apropiada cualquiera pero conocida  $q_0$ , a través del instrumento (o a través de los bornes de la impedancia de medición  $Z$ ). Dichos pulsos, pueden ser producidos por medio de un generador que emita pulsos de tensión rectangulares de amplitud  $V_0$ , en serie con una pequeña capacitancia  $C_0$  conocida. El tiempo en el que el pulso de tensión alcanza su valor máximo, debe ser suficientemente corto, y la capacitancia  $C_0$  suficientemente pequeña, para que la duración del pulso de corriente, a través de  $C_0$  sea pequeña con respecto al tiempo de respuesta del instrumento (o con  $1/f_2$ , donde  $f_2$  es el límite superior de la frecuencia de respuesta).

El tiempo de amortiguamiento del pulso de tensión, debe ser grande con relación a este tiempo de respuesta. En estas condiciones, el pulso de calibración es equivalente a una descarga de amplitud.

$$q_0 = V_0 C_0$$

Para la obtención de pulsos de calibración de corto tiempo de subida, se emplean generalmente pequeños generadores alimentados por pilas que utilizan transistores o relevadores de contacto sumergidos en mercurio.

### 6.2.2 Calibración de los Instrumentos para Medir I o D

Los instrumentos para la medición de corriente de descarga promedio I o de razón cuadrática D, son calibrados inyectando pulsos como los descritos en 6.2.1, y deben satisfacer las mismas condiciones. Además, la frecuencia de repetición de los pulsos n, debe ser conocida. Si los pulsos se obtienen a partir de un generador de pulsos de tensión rectangular de frecuencia fundamental f<sub>0</sub> y si se van a utilizar los pulsos de corriente de ambos signos, positivos y negativos, la frecuencia de repetición n<sub>0</sub>, debe ser igual a 2 f<sub>0</sub>. En estas condiciones, la lectura del instrumento corresponde a una corriente de descarga promedio:

$$I = 2 f_0 \cdot V_0 \cdot C_0$$

o a una razón cuadrática:

$$D = 2 f_0 \cdot (V_0 C_0)^2$$

### 6.3 Calibración del Instrumento Insertado en el Circuito de Prueba Completo

La calibración del instrumento insertado en el circuito de prueba completo, se hace con el fin de determinar el factor por el cual hay que multiplicar las indicaciones del instrumento, para obtener el valor real en las condiciones de prueba con el objeto bajo prueba conectado. Este factor está influenciado por las características del circuito, principalmente por la relación de la capacitancia del objeto bajo prueba y la del capacitor de acoplamiento, C<sub>p</sub>/C<sub>0</sub>. Debido a esto, la calibración debe hacerse para cada nuevo objeto bajo prueba, excepto, en el caso de pruebas realizadas sobre objetos prácticamente idénticos. La calibración, se realiza para uno o algunos pocos valores de la magnitud a medir.

Esta calibración puede servir para verificar el valor mínimo de la intensidad de los descargos detectados. Este valor mínimo, está influenciado por el nivel de perturbaciones y por las características del circuito (véase 6.4 y Apéndice E).

#### 6.3.1 Calibración de Circuitos de Prueba para la Medición de q, I o D

La calibración de instrumentos de medición de q, I o D, insertados en el circuito de prueba completo, debe hacerse inyectando pulsos de corriente entre los bornes del objeto bajo prueba, como se indica en las figuras 4a y 4b. En el caso del circuito de prueba representado en la figura 4b, es importante notar que los resultados serían erróneos si los pulsos de calibración son aplicados entre el borne de

alta tensión y tierra. En el mismo caso, se introducen errores por la presencia, entre el punto de unión de C<sub>0</sub> con el generador de pulsos de tensión y la tierra, de cualquier capacitancia parásita de valor no despreciable con respecto a la de C<sub>0</sub>.

Los pulsos de calibración, se obtienen de la manera descrita en 6.2.1, y deben satisfacer las prescripciones dadas en 6.2.1 y 6.2.2. Además, de estas prescripciones el valor de C<sub>0</sub> de la capacitancia de calibración, debe ser inferior a 0.1 C<sub>0</sub> aproximadamente, o menos que, esta capacitancia permanezca conectada durante la prueba. El pulso de calibración es entonces equivalente a una descarga de magnitud,

$$q_0 = V_0 C_0$$

Otro medio para la obtención de pulsos de calibración, consiste en utilizar una fuente de descargos por efecto corona (véase por ejemplo la Nota Técnica 2, Apéndice G y la figura 5). Tales dispositivos pueden servir de medio de control secundario de instrumentos de medición de la carga aparente, pero deben ser calibrados previamente.

#### 6.3.2 Calibración de Circuitos de Prueba para la Medición de la Potencia de la Descarga, P

En la Nota Técnica 1, (Apéndice F), se dan informaciones sobre los principios de funcionamiento y sobre la calibración de los circuitos de prueba para los métodos de Trazo de Circuitos Cerrados y del puente de Schering modificada para la medición de la potencia de los descargos. Nótese que en estos casos, la calibración y el control del instrumento mismo, no están separados de la calibración del circuito.

### 6.4 Perturbaciones

#### 6.4.1 Fuentes de Perturbaciones

Las perturbaciones que pueden interferir sobre las indicaciones de instrumentos de medida de descargos parciales, se clasifican en dos categorías:

- Las perturbaciones que en principio son independientes, de la tensión aplicada al objeto bajo prueba; las cuales provienen por ejemplo, de maniobras en



otros circuitos, de máquinas con colector, de pruebas de alta tensión ejecutadas en los cercanías, de emisiones radioeléctricas, etc.

Las perturbaciones ligadas a la fuente de tensión, que crecen generalmente con la tensión de prueba, pero que no se producen en el objeto bajo prueba; las cuales pueden comprender, por ejemplo, descargas parciales en el transformador de prueba, sobre los conductores de alta tensión, en los pasamuros (cuando no forman parte del objeto bajo prueba), o de perturbaciones provenientes de arcos (chispas) debidos a una puesta a tierra defectuosa de objetos vecinos. Las perturbaciones pueden también, ser transmitidas de la fuente de baja tensión, o pueden ser causadas por descargas parciales o arcos de contacto.

#### 6.4.2 Control y Reducción de Perturbaciones

Las perturbaciones de las fuentes independientes de tensión, pueden ser detectadas por la lectura del instrumento cuando no está energizado el circuito de prueba. El valor leído sobre el instrumento, constituye la medición de estas perturbaciones.

Las perturbaciones de las fuentes dependientes de la tensión, son generalmente más difíciles de detectar. Un método consiste en desconectar el objeto bajo prueba, o de preferencia, en sustituirlo por un objeto exento de descargas. El circuito es entonces, energizado hasta el valor pleno de la tensión de prueba.

El empleo de un oscilógrafo como instrumento indicador, ayuda al operador a hacer la distinción entre las descargas parciales que se producen en el objeto bajo prueba y las perturbaciones externas, tales como el ruido de fondo. Permite algunas veces determinar el tipo de descargas; el efecto corona (véase 4.1), por ejemplo, se reconoce fácilmente.

La utilización de un circuito balanceado, permite frecuentemente al observador hacer la distinción entre los descargas en el objeto bajo prueba y las descargas en otras partes del circuito o el ruido de fondo, y así, compensar estos últimos. En la medición de un objeto compuesto bajo prueba, se puede permitir la distinción de descargas entre dos o más partes del mismo.

Los métodos de detección no eléctricos (véase 5.4), son frecuentemente utilizados para localizar efecto corona sobre los conductores de alta tensión o en las alrededores de la zona de pruebas. Estos pueden ser igualmente un medio independiente de confirmar la existencia de verdaderas descargas parciales internas.

#### 6.4.3 Niveles de Perturbación

No se puede dar ningún valor preciso concerniente a la importancia de las perturbaciones, pero como información general, se pueden citar que en áreas de pruebas no blindadas, en zonas industriales se pueden presentar perturbaciones equivalentes a descargas de algunos cientos de pC, y en particular en el caso de circuitos de prueba de grandes dimensiones geométricas. Empleando circuitos de prueba balanceados, tales perturbaciones pueden llevarse abajo de 10 pC.

El límite de medición residual de perturbaciones es el del propio montaje del sistema de prueba, en los locales de prueba blindados, con conexiones efectivas a tierra de todas las estructuras conductoras y tomando las precauciones necesarias para suprimir las perturbaciones de la fuente de alimentación y de otras redes eléctricas.

Este límite depende del ruido térmico en el circuito de prueba y en el amplificador, así como de la sensibilidad del instrumento mismo (véase Apéndice E).

### 7. METODOS DE PRUEBAS

#### 7.1 Requisitos Generales

Es necesario tener un control cuidadoso de todas las lecturas importantes, para obtener resultados repetitivos en pruebas de descargas parciales. En los siguientes incisos se dan los requisitos que se aplican al objeto bajo prueba y a la tensión de prueba.

Las Normas particulares pueden especificar requisitos adicionales para condiciones y métodos de prueba especiales. Estas Normas deben también especificar las características que son necesarias medir (lo que determina la selección del instrumento de medición, véase 5.1) y la intensidad de descarga mínima medible.

Para información de límites prácticos de intensidad mínima medibles debe hacerse referencia al inciso 6.4.3 y al Apéndice E.

Es importante que se registren en el reporte de prueba el valor de descarga parcial medida, el método de medición e información de calibración.

#### 7.2 Acondicionamiento del Objeto Bajo Prueba

El objeto bajo prueba, antes de ser probado, debe someterse al procedimiento de acondicionamiento especificado por la Norma correspondiente (tratamiento en vacío,

Impregnación en aceite, exposición a atmósfera húmeda, esfuerzos eléctricos y mecánicos, tratamiento térmico, etc.). Si no se especifica otro caso, debe estar seco, limpio y a temperatura ambiente durante la prueba.

**NOTA:** Es importante, para asegurar repetibilidad de resultados de prueba de descargas parciales, que las condiciones eléctricas, térmicas y mecánicas del objeto bajo prueba, estén bien definidas y sean estables. Aplicaciones previas de tensión pueden afectar los resultados de pruebas. Por lo tanto se recomienda un intervalo de reposo después del transporte o aplicaciones previas de tensión antes de hacer pruebas de descargas parciales.

### 7.3 Requerimiento para la Tensión de Prueba

Para pruebas de descargas parciales con tensión alterno, la tensión de prueba debe cumplir con los requisitos de la Norma Oficial Mexicana NOM-J-271 en vigor.

**NOTA:** Los armónicos altos de la tensión de prueba, aún de pequeña amplitud, pueden causar resultados erróneos ya sea afectando las condiciones de -- descarga parcial o porque pueden influir directamente las lecturas del -- instrumento. Deben ser reducidos cuando menos hasta que su influencia no sea detectable con la sensibilidad de medición requerida.

### 7.4 Elección del Procedimiento de Prueba

La especificación de procedimientos que deben usarse para tipos de prueba y objetos de prueba particulares, deben ser descritos en la Norma correspondiente. Estos procedimientos incluyen cualquier proceso preliminar de acondicionamiento, los niveles de tensión de prueba y frecuencia, secuencia y duración de la aplicación de tensión y o la correlación de los pruebas de medición de descargas con otras pruebas dieléctricas.

#### 7.4.1 Verificación de la Tensión Libre de Descargas

Se aplica al objeto bajo prueba, una tensión considerablemente menor de la tensión especificada como libre de descargas. Se eleva gradualmente hasta esta tensión y se mantiene por el tiempo especificado. Después se reduce y se desconecta. Se considera que el objeto bajo prueba pasó la prueba si las descargas no exceden una intensidad especificada.

**NOTA:** Este procedimiento no asegura que la tensión de extinción de descargas parciales, sea mayor que la tensión libre de descargas.

#### 7.4.2 Determinación de las Tensiones de Iniciación y de Extinción de Descargas - Parciales

Se aplica al objeto bajo prueba una tensión considerablemente menor de la tensión de iniciación y se eleva gradualmente hasta que las descargas excedan una intensidad especificada. Se registra la tensión de prueba a este límite de descarga. En tan pronto se incrementa la tensión en aproximadamente 10% y después se reduce a un valor al cual cesan las descargas o resultan menores que la intensidad especificada y se registra la tensión correspondiente a este límite de descarga.

El procedimiento se repite por lo menos 3 veces sin desconectar la fuente de alta-tensión o hasta que se obtengan valores consistentes de tensiones de iniciación y de extinción.

Si los valores no son consistentes debe hacerse un número suficiente de observaciones para establecer valores promedio significativos o para determinar la presencia de cualquier tendencia. Nótese que con algunos sistemas de aislamiento los valores de extinción y subsecuente iniciación pueden ser afectados por el tiempo durante el cual se mantiene la tensión arriba del valor de iniciación.

Sin embargo en ningún caso la tensión aplicada debe exceder la tensión de prueba dieléctrica aplicable al aparato bajo prueba. Nótese que, en el caso de aparatos con aceite o aislamiento sólido existe algún peligro de daño derivado de repetidas aplicaciones de tensión en el rango de la tensión de prueba dieléctrica.

**NOTA:** A los incisos 7.4.1 y 7.4.2.

En algunos casos aparecen descargas parciales esporádicas a una tensión relativamente baja y desaparecen en el acto o después durante la prueba.

Se recomienda que se mencione en el reporte de prueba la ocurrencia de dichas descargas.

#### 7.4.3 Medición de Intensidades de Descarga Parcial

La intensidad de descarga parcial en términos de la cantidad especificada se mide a una tensión específico, que puede ser considerablemente mayor de la tensión de iniciación de descarga parcial. La tensión se aumenta gradualmente desde un valor bajo hasta el valor especificado y se mantiene así por el tiempo especificado. La intensidad de descarga parcial se mide al final de este tiempo y después la tensión se reduce y se desconecta. Algunas veces la intensidad de las descargas se mide también mientras se está aumentando o disminuyendo la tensión o a lo largo del período de prueba completo.

**NOTA:** La cantidad usada como una medida de la descarga debe tener alguna relación con el deterioro progresivo que puede ser causada en el objeto bajo prueba en cuestión. La cantidad más adecuada aún no ha sido establecida, y puede ser que el deterioro debido a descargas parciales no pueda ser expresado en términos de cualquier cantidad sola.

### 7.5 Mediciones en Objetos Bajo Prueba con Devanados

En el Apéndice C se encuentra una guía, para la medición de descargas parciales en objetos bajo prueba con devanados.

### 8. BIBLIOGRAFIA

IEC 270-1968 Partial Discharge Measurements.

ASTM D-186B-1973 Detection and Measurement of Discharge (Corona) Pulses in Evaluation of Insulation Systems.

IEEE Std 454-1973 Recommended Practice for the Detection and Measurement of Partial Discharges (Corona) During Dielectric Tests.

## APENDICE A

### CIRCUITOS DE PRUEBAS

En las figuras 1a, 1b y 1c se muestran tres circuitos de prueba básicos diferentes, adecuados para la detección y medición de descargas parciales en equipos de alta tensión. Estos se describen brevemente a continuación.

FIGURA 1a.

El instrumento de medición, en este circuito, se coloca en el lado de tierra del capacitor de acoplamiento. Este arreglo tiene la ventaja de su simplicidad, el objeto bajo prueba es conectado directamente entre la fuente de alta tensión y tierra. Es importante un buen bloqueo del objeto bajo prueba de la fuente de alta tensión para frecuencias dentro del ancho de banda del instrumento (a través de la impedancia Z), de otra manera, los pulsos de descarga pueden pasar a través de la impedancia de la fuente.

FIGURA 1b.

En esta circuito, el instrumento de medición se coloca en el lado de tierra del objeto bajo prueba. Por lo tanto, el lado de baja tensión de éste, debe ser aislado de tierra. Este circuito tiene algunas ventajas en la supresión de interferencia; si  $C_k$  es grande comparada con  $C_0$  los disturbios son disminuidos aproximadamente en la razón  $C_0/C_k$ .

**NOTA:** Algunas veces se usa un circuito que esencialmente es como se muestra en la Figura 1b, pero donde  $C_k$  es cero. Este arreglo puede ser adecuado si la capacitancia del objeto bajo prueba es pequeña comparada con la capacitancia parásita a tierra. Puede ser también satisfactorio si la capacitancia terminal del transformador de prueba es por lo menos del mismo orden que  $C_0$ , siempre que Z sea pequeña o cero.

FIGURA 1c.

El arreglo mostrado comprende un circuito balanceado, en el cual el instrumento de medición se conecta entre las impedancias  $Z_m$  y  $Z_{m1}$ . Tanto el lado de baja tensión del objeto bajo prueba como la capacitancia de acoplamiento se deben aislar de tierra. Las capacitancias de las partes conectadas a  $Z_m$  y  $Z_{m1}$  no se requiere que sean iguales, pero deben ser preferentemente del mismo orden, y para mejores resultados sus factores de pérdidas dieléctricas deben ser similares. El circuito tiene

| Clase                                                               | Cantidad medida                                                          | Características de varios instrumentos                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | Incluye        |
|---------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------|
| Instrumentos para la medición de descargas individuales             | Carga aparente, $q$                                                      | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Orlotoscopio de rasas cilíndricas con exposición de pulsos individuales</li> <li>- Medidor que indica los picos de descargas (calibrado en pica-coulombs de lectura, <math>q</math>)</li> <li>- Repuesta en banda ancha o banda angosta</li> </ul>                                                                                             | 5.1.1<br>6.2.1 |
| Instrumentos para medición de la frecuencia de repetición de pulsos | Frecuencia de repetición, $n$ (en función de la carga aparente-<br>$q$ ) | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Contador electrónico que indica el número de descargas en un tiempo dado</li> <li>- Audidores de frecuencia de repetición, que indican el número promedio de descargas/segundo</li> <li>- Discriminadores para ajustar la gama de magnitud medida</li> </ul>                                                                                   | 5.1.2          |
|                                                                     |                                                                          | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Medidor de lectura promedio de corriente de descarga</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                                | 5.1.3<br>6.2.2 |
| Instrumentos de medición de cantidades de descargo integrados       | Corriente de descargo promedio, $I$                                      | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Medidor que indica la razón cuadrática</li> <li>- Detector de ley cuadrática o detector térmico</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                     | 5.3.4<br>6.2.2 |
|                                                                     | Razón cuadrática, $D$                                                    | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Puente de capacitancia que da el diagrama de rayos catódicos y exposición de energía por ciclo en un osciloscopio de rayos catódicos (de trazo cerrado)</li> <li>- Puente de Schering sucesivamente balanceada con un detector de notas sincronizada a la frecuencia de la tensión de prueba y con un indicador de rayos catódicos.</li> </ul> | Apéndice F     |
| Medidores de Radio Interferencia                                    | Tensión de coexistencia $P$                                              | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Medidor que indica la tensión de coexistencia (escala logarítmica)</li> <li>- Respuesta de banda ancha (<math>\approx 9</math> KHz) con frecuencia variable sintonizada</li> <li>- Circuitos comparadores que determinan la influencia de la frecuencia de repetición, <math>n</math></li> </ul>                                               | Apéndice D     |

La ventaja de eliminar disturbios externos. Para ajustar esta eliminación se puede conectar una fuente de descargo artificial entre la terminal de alta tensión y tierra. Entonces se ajusta la impedancia  $Z_m$  y  $Z_{m1}$  hasta que se obtiene una mínima lectura del instrumento. Es posible tener razones de reducción desde 3 (para objetos bajo prueba totalmente diferentes) hasta 10 000 (para objetos idénticos perfectamente blindados).

De estos circuitos básicos, se pueden originar muchas variaciones, dos de los cuales se muestran en las figuras 2 y 3.

FIGURA 2.

El arreglo mostrado en la figura 2, aplicable a objetos bajo prueba, equipada con boquillas tipo capacitor, es equivalente al de la figura 1a, excepto que la capacitancia de la boquilla es usada en lugar del capacitor de acoplamiento  $C_k$ . Si la boquilla tiene una derivación en la primera lámina intermedia, la impedancia de medición se conecta a esta terminal; en este caso aparece una capacitancia relativamente grande  $C_m$ , a través de la impedancia de medición.

Si no se proporciona tal terminal, se puede aislar la brida de la boquilla de su montaje en el objeto bajo prueba y hacer la conexión de medición a esta brida, en cuyo caso la capacitancia a través de  $Z_m$  tiende a ser pequeña.

FIGURA 3.

En la figura 3 se muestra una variación del circuito balanceada de la figura 1c. El objeto bajo prueba, puede ser por ejemplo una muestra corta de un cable en el cual el blindaje o la cubierta metálica es reemplazada por un recubrimiento semiconductor, en caso de que no la tenga sobre una longitud corta aproximadamente en el punto central; el blindaje o la cubierta metálica se deja aislada de las partes aterrizadas de entrada a las boquillas.

Se pueden identificar la parte o partes con descargas haciendo ajustes de balance con pares de electrodos de potencial de tierra conectados al puente, mientras que los otros se dejan conectados a tierra.

NOTAS:

- 1.- Los osciloscopios comercialmente disponibles, con amplificadores de banda ancha, se pueden utilizar con instrumentos que dan únicamente una indicación de medida, para observar la distribución de pulsos de descarga en el tiempo, magnitudes relativas, forma del pulso, etc. Esto también ayuda a distinguir entre las descargas parciales y las perturbaciones.
- 2.- Transformadores de acoplamiento, se usan con varios tipos de instrumentos. Véase Apéndice E, Nota 2.
- 3.- La calibración interna del generador de pulsos está integrada en muchos instrumentos. Véase, sin embargo, las incisos 6.2.1 y 6.3.1 relativos a las especificaciones de los generadores de pulsos para la calibración del circuito de prueba completo.

APENDICE C

MEDICIONES SOBRE OBJETOS BAJO PRUEBA CON DEVANADOS Y SOBRE CABLES

En principio, puede usarse alguno de los circuitos de prueba descritos en el Apéndice A, para objetos bajo prueba con devanados y para cables, es decir, para objetos bajo prueba con elementos capacitivos e inductivos distribuidos. Para algunos de estos objetos de prueba, la tensión de prueba puede ser inducida, por ejemplo, el devanado de alta tensión de un transformador puede ser excitado desde el devanado de baja tensión, en cuyo caso la impedancia  $Z$  y la fuente de tensión  $V$ , mostrados en las figuras 1, 2 y 3 no tienen significado; por lo que entonces se recomienda que las perturbaciones que llegan por la alimentación de baja tensión sean reducidas mediante el uso de filtros pasa-bajas.

Esta Norma no cubre un estudio detallada de medición de descargas parciales sobre objetos con elementos distribuidos. Sin embargo, los siguientes puntos, son de especial importancia y se incluyen para atraer la atención de los Comités Técnicos correspondientes.

- Fenómenos de Atenuación.

Debido a la atenuación dentro de devanados o a lo largo de cables, la cantidad medida en una terminal del objeto bajo prueba puede diferir en magnitud con respecto a la existente en el punto donde se origina.

- Fenómeno de resonancia o de reflexión.

La cantidad medida en una terminal de un devanado o cable bajo prueba puede ser modificada por fenómenos de resonancia o por reflexiones en las terminales. Esto es especialmente importante si el instrumento de medición usado tiene una respuesta de frecuencia en banda-angosta.

- Características de Impedancia.

Un objeto bajo prueba con devanados no se comporta como una capacitancia simple  $C_0$ , sino frecuentemente tiene las características de una impedancia transitoria, generalmente con una capacitancia agregada en paralelo.

- Localización de descargas.

Se pueden usar varios métodos para localizar descargas parciales en devanados o cables. Algunas de estos métodos están basadas en mediciones simultáneas en dos o más terminales del objeto bajo prueba. Se pueden aplicar así mismo, métodos no eléctricos (véase 3.4).

### APENDICE D

#### USO DE MEDIDORES DE RADIO INTERFERENCIA PARA MEDICION DE DESCARGAS PARCIALES

En varias especificaciones se dan los requisitos para los instrumentos de uso común. Sus respuestas se determinan generalmente por filtros que tengan un ancho de banda pequeña y una frecuencia media variable definidas y además por un circuito de medición de cresta con una constante de tiempo de carga  $t_1$  y una constante de tiempo de descarga  $t_2$ . El medidor de indicación es un instrumento de bobinas móvil, críticamente amortiguado, que tiene también una constante de tiempo mecánica  $t_3$ . Estos instrumentos se usan también, en ocasiones, a frecuencias del orden de 1 MHz para la medición de descargas parciales.

Debido a sus características especiales, los medidores de radio interferencia no indican directamente ninguna de las cantidades de las descargas parciales definidas en esta Norma (véase 4.3 y 4.4), pero dan una indicación general de la intensidad de la descarga.

La lectura  $V_r$  del medidor, depende de la magnitud de la descarga parcial  $q$  y de la frecuencia de repetición  $n$ , para pulsos cortos repetidos regularmente, la lectura está dada aproximadamente por:

$$V_r \approx |q| \cdot f(n) \cdot \Delta f \cdot Z_m \cdot K$$

donde:

- $f(n)$  Es una función no lineal de  $n$ .
- $\Delta f$  Es el ancho de banda del instrumento.
- $Z_m$  Es el valor de la impedancia de medición puramente resistiva.
- $K$  Es un coeficiente, cuyo valor depende del circuito y del objeto bajo prueba.

Por lo tanto, la lectura es proporcional a la magnitud de la descarga  $|q|$  y al ancho de banda del instrumento. En la práctica, la expresión puede no ser proporcional a  $Z_m$  si ésta tiene capacitancias parásitas o inductancias. El factor  $f(n)$  no es estrictamente aplicable si los pulsos de las descargas están distribuidos irregularmente en el tiempo.

Uno de estos instrumentos que se designa como voltmetro de cuasifrecuencia está descrito en la Publicación 1 del CISPR (Comité International Spécial des Perturbations Radiées Électriques) de la Comisión Electrotécnica Internacional (IEC). Esta publicación es la

"Especificación para aparatos de medición de radio interferencia para el rango de frecuencias de 0.15 MHz a 30 MHz" y especifica un ancho de banda  $\Delta f$  de 9 kHz y constantes de tiempo  $t_1 = 1$  ms,  $t_2 = 160$  ms y  $t_3 = 100$  ms. Para mediciones de radio interferencia, el aparato se calibra utilizando una tensión sinusoidal a la frecuencia a la cual el aparato está sintonizado, y la tensión de interferencia se expresa convencionalmente como el valor rms de una tensión sinusoidal equivalente. Aplicando al instrumento pulsos cortos y constantes de  $0.158 \mu V_s$ , con una frecuencia de repetición regular de 100 por segundo, debe dar la misma lectura que la obtenida al aplicarle una onda sinusoidal de  $1000 \mu V$ , con a la frecuencia de sintonía. En la figura 6, se muestra la variación  $f(n)$  de la lectura con la frecuencia de repetición  $n$  para este instrumento.

El suplemento 1A de la publicación CISPR antes mencionada, da las especificaciones del uso de este instrumento para mediciones de tensión de radio interferencia generada por equipos de alta tensión. En él se describen dos circuitos de prueba, los cuales están de acuerdo con las figuras 1a y 1b de esta Norma y también son aplicables para la medición de descargas parciales.

Si se usa un medidor de radio interferencia para mediciones de descargas parciales, éste debe ser verificado y calibrado en el circuito real de prueba de acuerdo con 6.3.1. Se recomienda que esto se haga mediante la aplicación de pulsos repetidos en forma regular  $q_0$ , con una repetición aproximadamente igual a dos veces la frecuencia de la tensión de prueba. La magnitud de las descargas parciales durante una prueba con tensión próxima a la de intefación, dando el número de pulsos por ciclo es usualmente pequeño, es aproximadamente igual a  $q_0$  multiplicada por la relación de la lectura del instrumento durante la prueba a la obtenida durante la calibración. Esta relación también se aplica en una gama limitada de frecuencias de repetición de pulsos donde la variación de lecturas debida al factor  $f(n)$  es pequeña.

Siempre que se efectúen mediciones de magnitud de descargas parciales con un medidor de radio interferencia, se deben indicar la lectura en microvolts y el valor equivalente estimado de la magnitud de descargas parciales.

NOTA: Cuando no se haya efectuado la calibración, y como una conversión muy aproximada sujeta a la aplicación adecuada del factor para el efecto de los parámetros del circuito de prueba, se puede suponer una equivalencia de  $1 \mu V = 1 pC$  para la medición de descargas continuas a una tensión cercana a la tensión de iniciación durante una prueba a 50 Hz (cuando  $n = 100$  pulsos por segundos) usando una resistencia de medición de  $150 \Omega$ .

## APENDICE E

## CANTIDADES MINIMAS MEDIBLES

La intensidad mínima de las descargas parciales que puede medirse en una prueba particular está limitada en general por disturbios (véase 6.4.3). Sin embargo, donde estos disturbios se eliminan efectivamente mediante blindajes adecuados o por el uso de un circuito de prueba balanceado, los límites se determinan por el nivel de ruido interno del instrumento mismo y por los valores de los parámetros del circuito de prueba, especialmente  $C_0$ ,  $C_k$ ,  $Z_m$  y alguna capacitancia  $C_m$  en paralelo con  $Z_m$ . En general, la intensidad mínima medible aumenta con el incremento en los valores de  $C_0$ ,  $C_m$ ,  $1/Z_m$  y la relación  $C_0/C_k$ .

En la tabla siguiente se indican los valores representativos de las cantidades mínimas que pueden medirse en la práctica con los instrumentos existentes, bajo condiciones favorables. Estos valores se refieren a los circuitos de prueba en los cuales  $C_k \approx C_0$ . En el caso particular cuando  $C_0 = 10^4$  pF, los valores se refieren a una resistencia  $Z_m$  de 100  $\Omega$  correspondientes a una constante de tiempo ( $\frac{1}{2} C_0 Z_m$ ) de 0.5  $\mu s$ , considerando la Nota 2. Los valores son aplicables cuando los disturbios externos son suficientemente pequeños; pero en las áreas de prueba industrial, en muchos casos no se dispone del blindaje necesario para cumplir este requisito.

| Cantidad medida                                                   | $C_0 = 100$ pF                                                                                                                                                                                 | $C_0 = 10^4$ pF       | $C_0 = 10^7$ pF           |
|-------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------|---------------------------|
| Magnitud de la descarga - IQI (coulomb)                           | $0.01 \times 10^{-12}$                                                                                                                                                                         | $0.2 \times 10^{-12}$ | $5 \times 10^{-12}$       |
| Corriente promedio de las descargas parciales I (coulomb/segundo) | $0.01 \times 10^{-9}$                                                                                                                                                                          | $0.2 \times 10^{-9}$  | $20 \times 10^{-9}$       |
| Razón cuadrática - D (coulomb <sup>2</sup> /segundo)              | $0.5 \times 10^{-21}$                                                                                                                                                                          | $2 \times 10^{-21}$   | $20\ 000 \times 10^{-21}$ |
| Potencia de descarga P (watt)                                     | La potencia mínima medible de una descarga depende de la tensión de prueba (véase 4.5). Su valor usualmente corresponde a una corriente promedio de descarga I mayor que las indicadas arriba. |                       |                           |

## NOTAS:

- Los valores mínimos de la corriente promedio I y de la razón cuadrática D indicados en la tabla, para  $C_0 = 10^4$  pF, corresponden a descargas de 2 pC para la corriente promedio y de 4.5 pC para la razón cuadrática ambas repetidas 100 veces por segundo. Una potencia de descarga correspondiente aproximadamente a 50 pC con 100 repeticiones por segundo puede medirse por el método de traza de circuito cerrado descrito en el inciso 5.3.5 y en la Nota técnica 1 del Apéndice F.
- El uso de un transformador de acoplamiento entre el circuito de prueba y el instrumento, en muchos casos incrementa la sensibilidad de medición para objetos bajo prueba de capacitancias muy pequeñas o muy grandes. Con un transformador de acoplamiento que tenga una relación óptima y un valor adecuado de  $C_k$ , la cantidad medible mínima es proporcional aproximadamente a  $\sqrt{C_0}$  sobre una gama amplia de valores de  $C_0$ .

## APENDICE F

### NOTA TÉCNICA 1.- Métodos para Medir la Potencia de Descargas Parciales

Los siguientes son dos circuitos de prueba usados para la medición de la potencia de descargas parciales. Los requisitos para su calibración se indican en cada uno de los casos.

#### Método de Trazo de Circuito Cerrado.

El método de trazo de circuito cerrado usa un circuito tipo puente y en la figura 7 se muestra una forma típica del circuito de prueba. Los pulsos de descarga que ocurren en cada medio ciclo son integrados en el capacitor de baja tensión  $C_2$ , y la diferencia de tensión resultante entre los puntos 1 y 2 se aplica a un par de placas deflectoras de un osciloscopio de rayos catódicos; lo cual puede hacerse transfiriéndola por medio de un amplificador diferencial, o un transformador de pulsos de alta impedancia y un amplificador, que tengan respuesta en frecuencia bastante mucho menor de la frecuencia de prueba. Para el otro par de placas, se aplica una fracción conveniente de la tensión de prueba. Se hace un arreglo balanceado a fin de obtener una respuesta nula a la frecuencia de la tensión de prueba la cual debe ser ligeramente menor a la tensión de iniciación de descargas.

Para las tensiones que originan descargas en el objeto bajo prueba, el área del oscilograma, figura 7b, representa la energía por ciclo debida a las descargas solamente. Se supone en el uso de este método que, aparte del efecto de las descargas parciales, el factor de pérdidas dieléctricas no varía con la tensión.

La calibración solamente comprende la determinación de los coeficientes de escala del osciloscopio  $A$ , en volt/cm para la tensión de prueba (valor instantáneo) y  $\alpha$ , en coulomb/cm para la carga aplicada al capacitor de baja tensión  $C_2$ , figura 7a. Este último factor puede encontrarse más fácilmente haciendo pasar a través de  $C_2$  una corriente alterna  $I_0$  (cresta) conocida, de frecuencia  $f$ . Esto corresponde a una transferencia de carga  $I_0/\pi f$  en cada medio ciclo. Si los errores de  $f$  se y amplitud a la frecuencia de prueba son despreciables, la potencia se calcula como sigue:

$$P = A \cdot f \cdot \alpha \cdot d_1$$

donde:

$A$  = Es el área en  $\text{cm}^2$  del diagrama trazado sobre la pantalla del osciloscopio (figura 7b).

$f$  = Es la frecuencia de la tensión de prueba.

#### Método del Puente de Schering Modificado.

Un puente de Schering convencional puede modificarse para medir las pérdidas de potencia en el objeto bajo prueba debido a las descargas parciales, agregándole un osciloscopio de rayos catódicos que tenga un amplificador diferencial de respuesta constante a frecuencias mucho menores de la prueba (véase figura 8a). El puente se debe balancear primeramente a la tensión de prueba, según la manera convencional, usando un galvanómetro con sensibilidad adecuada o un detector de nulas sincronizado a la frecuencia de prueba. Si el osciloscopio de rayos catódicos se conecta en lugar del galvanómetro y ocurren descargas, éstas deben mostrar un patrón similar al de la figura 8b 1. A continuación se usa el osciloscopio para volver a balancear el puente para las pérdidas dieléctricas normales y corrientes capacitivas; despreciando los pulsos de descarga. Esto se indica por un oscilograma similar al de la figura 8b 2, en el cual los pulsos de descarga aparecen elevándose prácticamente desde la línea recta (despreciando cualquier armónico de la frecuencia de prueba).

Los valores de la capacitancia bajo prueba  $C_0$ , y el factor de pérdidas dieléctricas  $\text{Tan } \delta$ , se calculan de los valores de los componentes del puente, para cada una de las dos condiciones de balance. De estos valores y de la tensión de prueba conocida,  $V$ , se calculan los valores de la pérdida de potencia dieléctrica  $P_1$  y  $P_2$  en el objeto bajo prueba:

$$P_1 = V^2 \omega C_{01} \cdot \text{Tan } \delta_1 \quad P_2 = V^2 \omega C_{02} \cdot \text{Tan } \delta_2$$

donde:

$V$  = Es el valor rms de la tensión de prueba.

$\omega$  =  $2 \pi f$ , y es la frecuencia angular.

Los subíndices 1 y 2 se refieren a la primera y segunda mediciones respectivamente.

La potencia de descargas parciales está dada por:

$$P = P_1 - P_2$$

El método del puente de Schering modificado no involucra la consideración de que el factor de pérdidas dieléctricas sea constante con la tensión variable. La calibración del puente de Schering no se requiere salvo la verificación de la exactitud de los valores de los componentes del puente y del instrumento usados para medir la tensión de prueba.



APENDICE G

NOTA TECNICA 2.- Fuente de Referencia de Pulsos de Descargas por Efecto Corona

En la figura 5, se ilustra un tipo de fuente de referencia de pulsos de descargas por efecto corona, el cual es adecuado para conectarse directamente en el lado de alta tensión del circuito de prueba. El dispositivo consiste esencialmente de una punta de acero inoxidable dirigida hacia la cara interna de un hemisferio metálico. Los electrodos así constituidos deben estar convenientemente protegidos contra polvo, grasa, humedad, etc.

El dispositivo proporciona descargas por efecto corona de magnitud prácticamente constante |q|, las cuales están en función del radio r de la punta de acero inoxidable, siendo ligeramente afectadas por el radio R del hemisferio y por pequeños desplazamientos axiales del punto.

Las condiciones de operación típicas son:

| Radio de la punta, r<br>mm | Tensión de iniciación, V <sub>i</sub><br>kV | Magnitud de la descarga,  q <br>pC |
|----------------------------|---------------------------------------------|------------------------------------|
| 0.05                       | 3.8                                         | 40                                 |
| 0.2                        | 6.5                                         | 140                                |
| 0.5                        | 8.5                                         | 240                                |

La frecuencia de repetición de pulsos corresponde a unos pocos pulsos por ciclo de la tensión de prueba o la tensión de iniciación y se incrementa progresivamente a medida que la tensión aplicada es elevada hasta 1.4 V<sub>i</sub> sin efecto apreciable en la magnitud de la descarga.

APENDICE H

NOTA TECNICA 3.- Medición de Descargas Parciales Durante Pruebas con Tensión en C. D.

Los estudios de laboratorio y las experiencias prácticas señalan que la aplicación de tensión en C.D. por un período largo, la cual da lugar a descargas parciales, puede conducir a procesos de ruptura de los aislamientos, análogos a los causados por descargas parciales bajo tensión alterna, y a efectos secundarios similares como la formación de cera X en equipo aislado con aceite mineral.

De igual manera que bajo condiciones de tensión alterna, el deterioro de un medio aislante sometido a descargas parciales bajo tensión en C.D., está en función de la intensidad del campo, la magnitud del pulso y la frecuencia de repetición de los pulsos. Sin embargo, en descargas bajo tensión en C.D. la información disponible es menor que bajo tensión alterna.

Bajo ciertas condiciones, la frecuencia de repetición de pulsos parece ser comparable a la originada por tensión alterna. Las condiciones que incrementan esta frecuencia de repetición son:

- La presencia de humedad en el aislamiento.
- Para aislamiento húmedo, se ha encontrado conveniente prolongar el período de aplicación de la tensión de prueba por varios minutos.
- Aplicaciones previas de sobretensión, las cuales originan una reducción de la tensión de iniciación.
- La presencia de rizados de amplitud larga en la tensión de pruebas.

Esto ocurre en servicio, por ejemplo con algunos aparatos en plantas generadoras de alta tensión de C.D. Con una componente de tensión alterna de amplitud -- largo, la frecuencia de repetición de descargas parciales puede ser prácticamente independiente de la amplitud de la tensión en C.D.

Para tensión en C.D., con o sin rizados pequeños, la frecuencia de repetición de los pulsos depende principalmente del producto de la permitividad y resistividad de dispersión del aislamiento.

Nótese que a menudo la frecuencia de repetición de descargas decrece durante el período cuando la tensión de prueba se mantiene en su valor constante.

La medición de descargas paralelas con tensión en C.D. puede hacerse, en principio, con los mismos circuitos de prueba, y los mismos instrumentos, que para tensión alterna. No obstante que la frecuencia de repetición de los pulsos puede ser mucha menor que para tensión alterna, los pulsos erráticos causados por disturbios externos pueden hacer más difícil esta medición. Por esta razón, se usa generalmente el circuito balanceado de la figura 1a, el cual suministra los medios para eliminar los descargas erráticas de la medición. La frecuencia de repetición baja también puede hacer que se adopten requisitos especiales con respecto a los instrumentos de medición (especialmente para sus constantes de tiempo) y los métodos de observación o registro. También puede exigirse un tiempo de aplicación de la tensión considerablemente mayor.

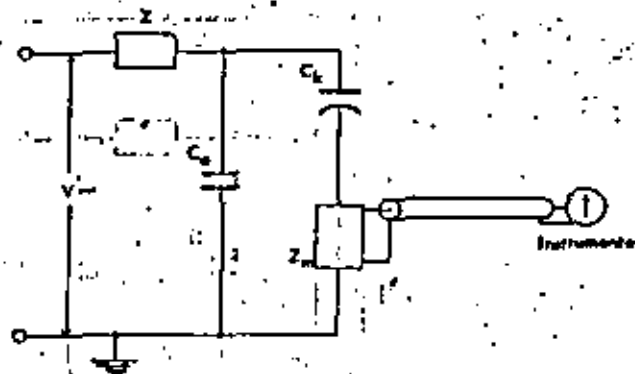


FIGURA 1a.- Instrumentos conectados en serie con el espectro de acoplamiento

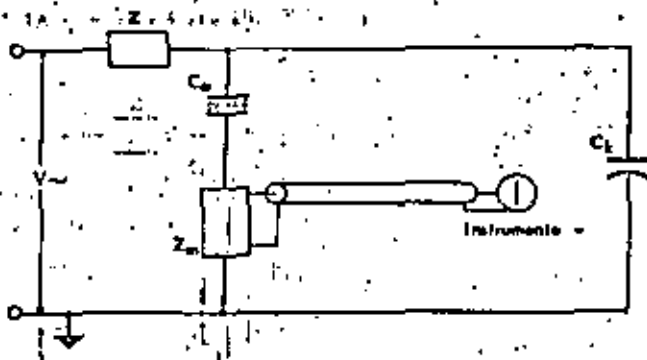


FIGURA 1b.- Instrumentos conectados en serie con el objeto, bajo prueba

|            |                                                                   |                       |
|------------|-------------------------------------------------------------------|-----------------------|
| NO14-J-335 | Circuitos de prueba lógicos para la prueba de descargas paralelas | sin escala            |
| FIG. N° 1  |                                                                   | sin acotación         |
|            |                                                                   | Diseño: L. D. Carrero |

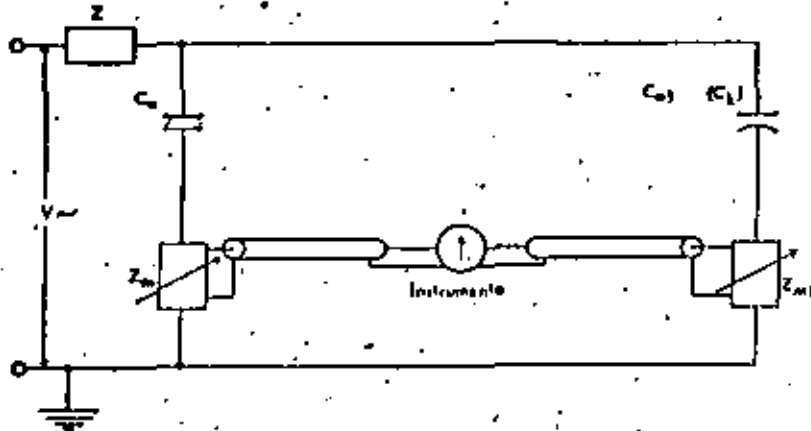


FIGURA 1c.- Arreglo de un circuito balanceado

NOM-J-335

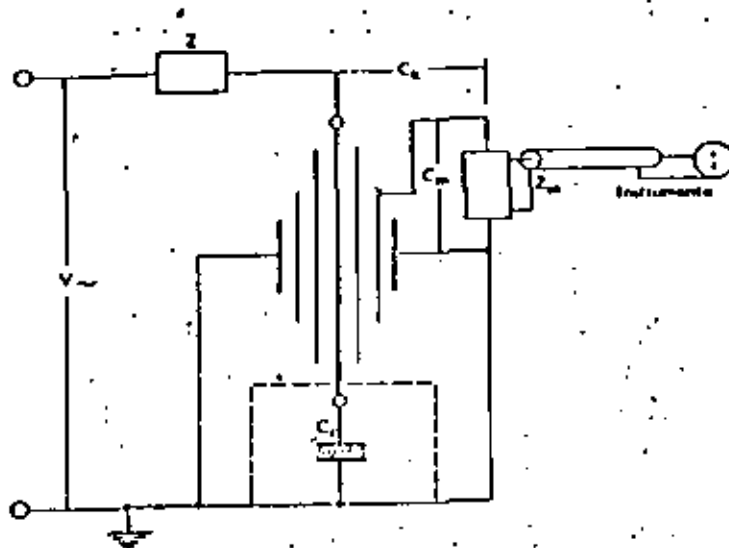
Circuitos de prueba lóxicos para la prueba de descargas parciales

sin escala

sin acolación

Diseño:  
C. Carrera L.

FIG. Nº 1



NOM-J-335

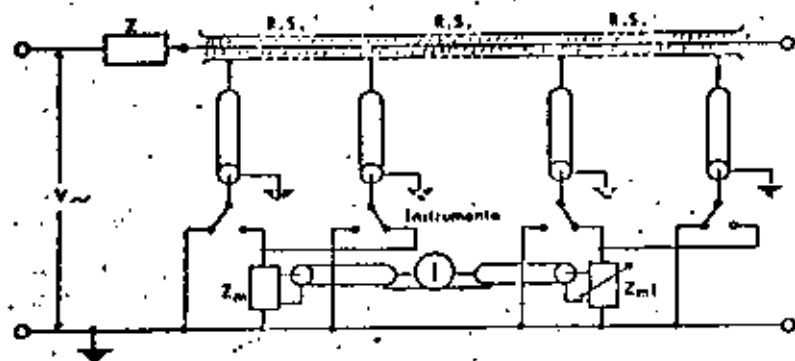
Círculo de prueba para la medición de descargas parciales en una bobina con derivación

sin escala

sin acolación

Diseño:  
L. G. Carrera

FIG. Nº 2



R.S. = Recubrimiento conductor

NOTA: En la figura se indica como ejemplo el caso de una muestra corta de cable.

NOM-J-335

Circuito balanceado modificado para la medición separada de diferentes secciones de un objeto bajo prueba

sin escala

sin anotación

Dibujó:  
L. S. Carrera

FIG. N° 3

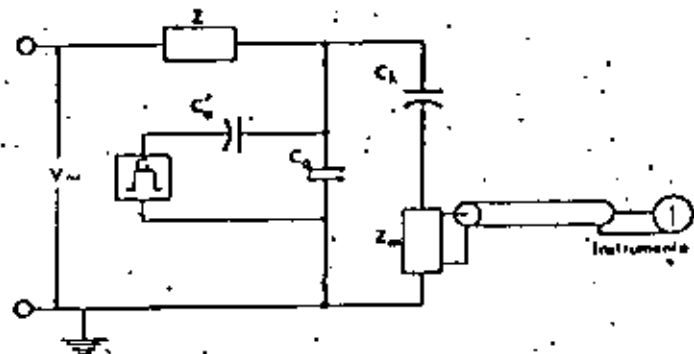


FIGURA 4a.-

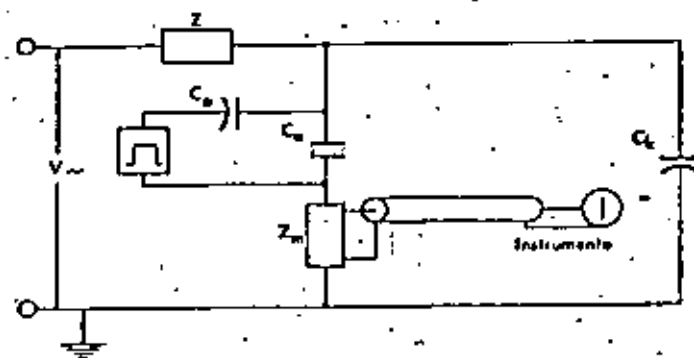


FIGURA 4b.-

NOM-J-335

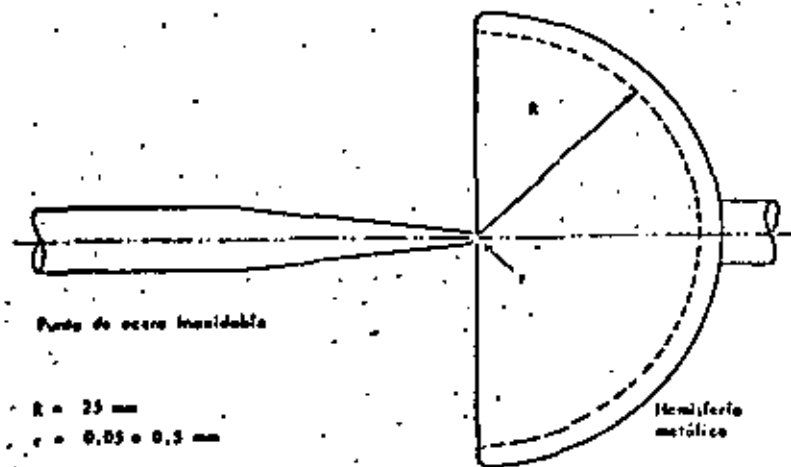
Conexiones para la calibración de un circuito de prueba completo

sin escala

sin anotación

Dibujó:  
L. S. Carrera

FIG. N° 4



NDM-J-335

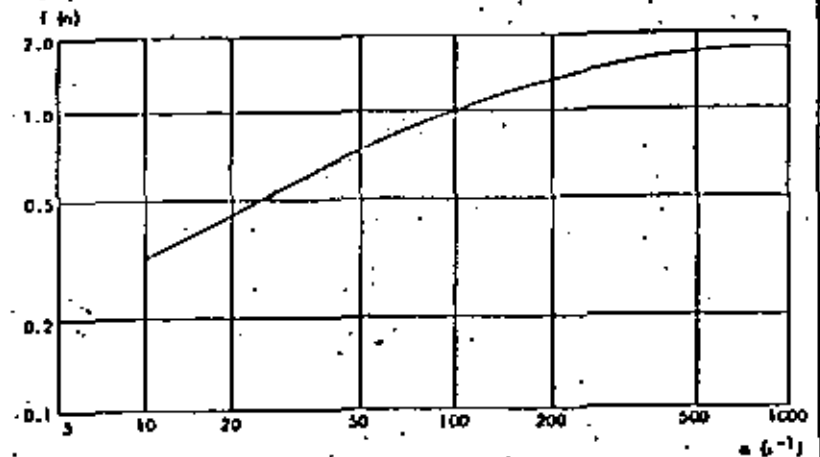
Fuente de referencia de pulsos de descargas por efecto corona

sin escala

sin anotación

Diseño:  
L. G. Carrera

FIG. N° 5



NDM-J-335

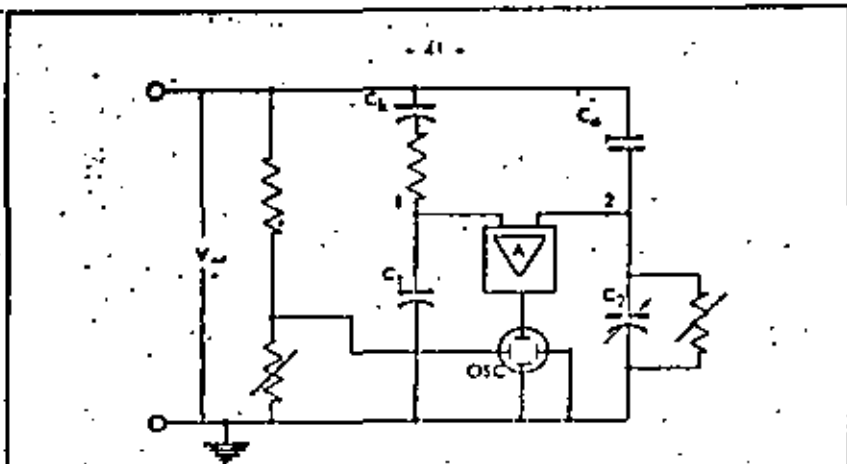
Variación de la lectura  $f(n)$  de un medidor de ruido interferencia CISPR con la frecuencia de repetición  $n$  para pulsos constantes

sin escala

sin anotación

Diseño:  
L. G. Carrera

FIG. N° 6



A = Amplificador operacional  
OSC = Osciloscopio

FIGURA 7a.- Forma típica del circuito de prueba

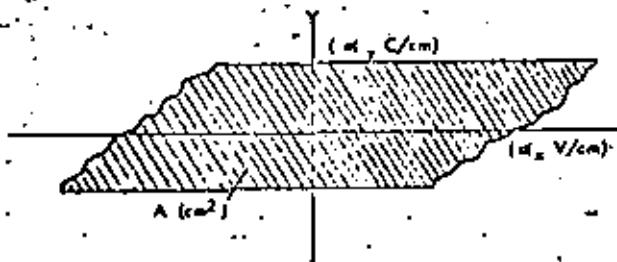


FIGURA 7b.- Oscilograma típica

NOM-J-335

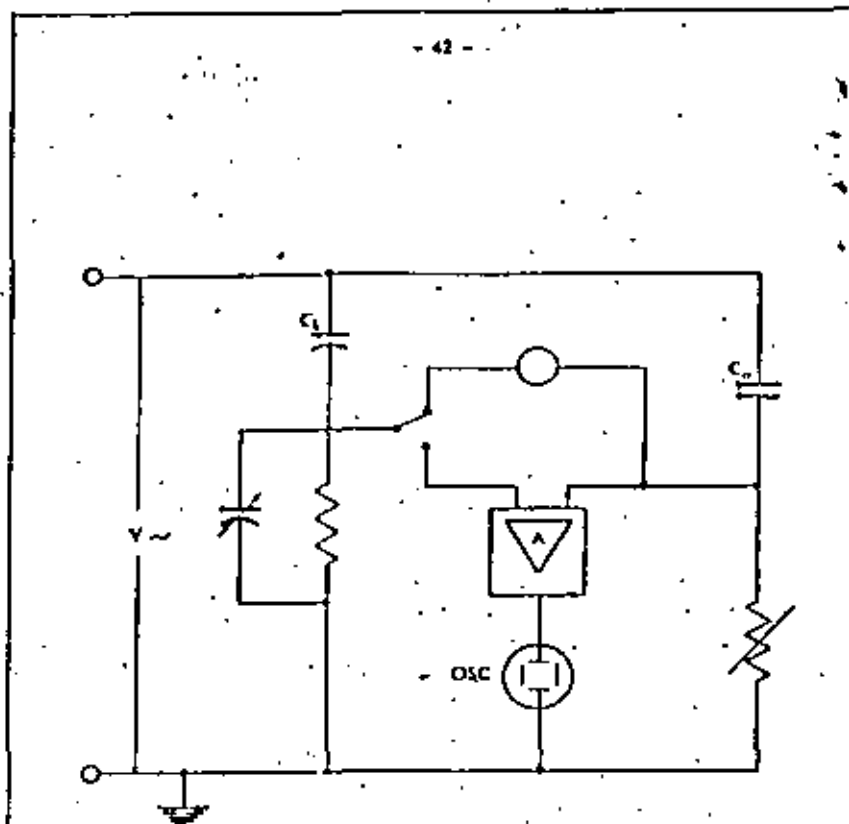
Método de traza de circuito cerrado para la medición de la potencia de descargas parciales

sin escala

sin acofación

Diseño:  
E. G. Carrero

FIG. N° 7



A = Amplificador operacional  
OSC = Osciloscopio

FIGURA 8a.- Arreglo del circuito de prueba

NOM-J-335

Puente de Schering modificado para la medición de la potencia de descargas parciales

sin escala

sin acofación

Diseño:  
E. G. Carrero

FIG. N° 8

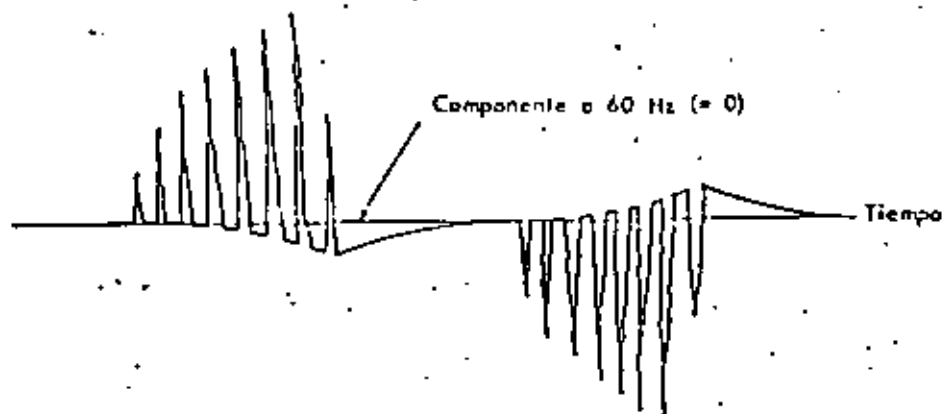


Fig. 8b1.- Oscilograma después del balanceo con un galvanómetro

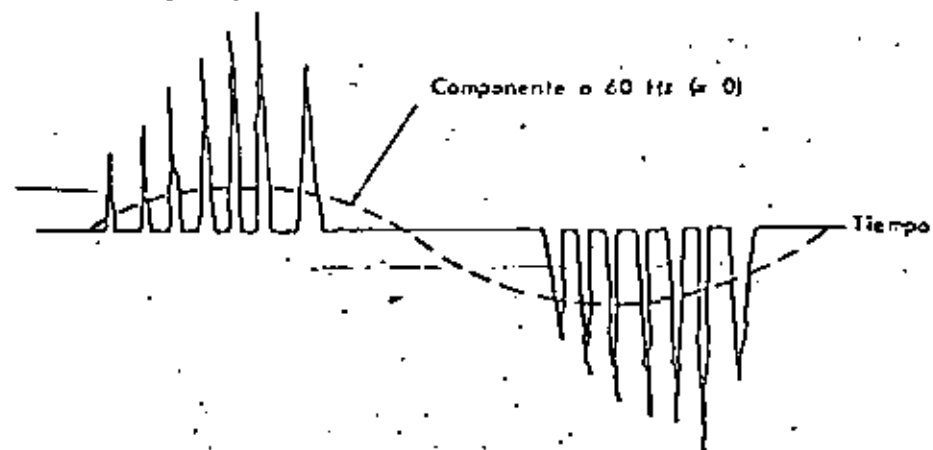


Fig. 8b2.- Oscilograma en condiciones de balance utilizando un osciloscopio de rayos catódicos

México, D.F. a

EL C. DIRECTOR GENERAL DE NORMAS

DR. ROMAN SEREA CASTAÑOS