

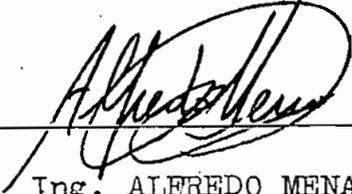
EL EFECTO CORONA Y SU
RELACION CON FACTORES
ATMOSFERICOS Y FISICOS

Tesis previa a la obtención del Título de
Ingeniero Eléctrico
de la Escuela Politécnica Nacional

PATRICIO ORBE GARCES

Quito, Diciembre de 1971

Certifico que el presente trabajo de
Tesis ha sido realizado en su totali
dad por el señor PATRICIO ORBE GARCES



Ing. ALFREDO MENA

Director de Tesis

P R O L O G O

Nuestro país está atravesando por una etapa de desarrollo en la que se están impulsando grandes proyectos hidroeléctricos. En la parte de la transmisión de esos proyectos se presentarán, entre otros, problemas sobre el efecto corona, para lo cual nosotros debemos estar preparados.

En el programa de investigaciones de la Facultad de Ingeniería Eléctrica de la Escuela Politécnica Nacional está incluido el estudio del efecto corona

Por los motivos mencionados nació la idea de utilizar este capítulo como tema de tesis.

El objeto de este trabajo es conocer más y mejor el fenómeno de corona utilizando un modelo para su estudio.

El trabajo que me he propuesto realizar es el primer paso que se da sobre este tema; investigar expe

rimentalmente a fondo sobre el efecto corona es un trabajo sumamente largo, de manera que he pensado y el Ing. Director de Tesis ha aprobado, que puede haber una o dos tesis más sobre este punto para que quede completamente terminado.

Todas las pruebas y ensayos efectuados durante el desarrollo de la presente tesis han sido realizados personalmente en el laboratorio de Alta Tensión de la Escuela Politécnica Nacional.

Es mi deseo que la investigación sobre el efecto corona no quede inconclusa y que en los programas de investigación de la Facultad se mantenga el interés por profundizar el conocimiento sobre este importante tópico de la Ingeniería Eléctrica.

Como orientación sobre el trabajo que seguirá debo indicar que éste se encaminará a estudiar el fenómeno de corona en condiciones arbitrarias de temperatura, humedad y lluvia, para lo cual se deben hacer los diseños correspondientes.

Se debe dar la importancia que merece el estudio de corona con corriente continua, en este trabajo se han hecho comparaciones muy elementales que solo sirven para dar idea del fenómeno en estas condiciones

El problema de la radio interferencia, RI,

no ha sido tocado.

Se ha pensado en la construcción de una pequeña línea experimental, a la intemperie, para comparar sus resultados con los obtenidos en el modelo cilíndrico que permitan abrir el camino para poder representar y estudiar en este modelo una línea real.

Quiero expresar mi agradecimiento más afusivo a la Escuela Politécnica Nacional, a través del Decano de la Facultad de Ingeniería Eléctrica, Ingeniero Jaime Velásquez, por todas las facilidades que ha prestado para el mejor desarrollo del presente trabajo; al profesor y amigo, Ingeniero Alfredo Mena, por su desinteresada guía y acertadas indicaciones y sugerencias.

Agradezco también a un buen amigo, el Ingeniero Jorge del Castillo, por su decidida colaboración a través del Departamento de Mantenimiento de la Escuela Politécnica Nacional, en la construcción de un sinnúmero de accesorios para completar el modelo cilíndrico de pruebas; al amigo y compañero, Ingeniero Ramiro Rodas, por su valiosa colaboración en el diseño del circuito de control automático para las pruebas de duración de los dieléctricos; a un buen amigo, el señor Rubén Castro, por su eficaz ayuda en la parte de fotografía y a todas las personas que han colaborado para

I N D I C E

Prólogo.....	iv
Tabla de símbolos.....	x
CAPITULO I EL EFECTO CORONA	
1.1 Naturaleza y manifestaciones de la corona.....	1
1.2 Magnitud de las descargas.....	9
1.3 Haces de conductores.....	10
1.4 Descargas en campos homogéneos producidos por electrodos cilíndricos.....	12
1.5 Pérdidas.....	19
1.6 Radio Interferencia.....	25
1.6.1 Fuentes de RI.....	25
1.6.2 Medida de la RI.....	26
1.7 Generación del ruido de corona.....	27
1.8 Modelo coaxial.....	28
CAPITULO II PRUEBAS EN EL MODELO	
2.1 Capacitancia del modelo.....	33
2.2 Intensidad de campo superficial.....	35

2.3 Pérdidas.....	40
2.3.1 Influencia del tamaño del electrodo central.....	42
2.3.2 Influencia de la densidad relativa del aire.....	49
2.3.3 Influencia de la frecuencia.....	52
2.3.4 Influencia del estado de la superficie de los conductores.....	52
2.3.5 Influencia del voltaje.....	58
2.3.6 Ecuación de pérdidas en el modelo...	59
2.3.7 Forma de la onda de corriente según el voltaje aplicado.....	60
2.3.8 Pruebas con corriente continua.....	63
2.4 Magnitud de las descargas.....	68
2.5 Análisis espectral de la onda de corriente.....	70
2.6 Nivel de ruido.....	72
2.7 Utilización del modelo cilíndrico en el estudio de una línea real.....	77
CAPITULO III CONCLUSIONES	79
APENDICE A DISEÑO Y CONSTRUCCION DEL MODELO CILINDRICO PARA PRUEBAS DE CORONA.....	82
APENDICE B DEFINICION DE TERMINOS RELATIVOS A CORONA.....	89
APENDICE C EQUIPOS UTILIZADOS.....	92
BIBLIOGRAFIA.....	93

T A B L A D E S I M B O L O S

AWG	American Wire Gage.
a_{mn}	Separación entre subconductores de un haz.
\bar{a}_r	Vector unitario en dirección radial.
\bar{a}_z	Vector unitario en dirección axial.
b	Presión barométrica, mm de mercurio.
C	Capacitancia, faradios.
\bar{D}	Vector densidad de flujo eléctrico.
D	Magnitud de \bar{D} .
d	Diámetro de un cilindro específico, cm.
dB	Decibel, unidad de medida de ruido.
d_0	Distancia crítica, cm.
dS	Elemento de superficie.
\bar{E}	Vector intensidad de campo eléctrico.
E	Magnitud de \bar{E} .
E_0	Gradiente crítico de iniciación de corona, kV/cm.
e	Base de los logaritmos naturales.
e'	Magnitud de las descargas de corona, kV. ?

Fr	Factor de rizado, tanto por ciento.
f	Frecuencia, cps.
fne	Función explícita.
I	Intensidad de corriente eléctrica, amperios.
kV	Kilo voltios, unidad de medida de diferencia de potenc.
k	Movilidad de los iones, $2480 \text{ cm}^2/\text{V.s.}$ Densidad relativa del aire (corregida). <u>NO !!</u>
L	Inductancia, henrios.
l	Longitud, metros.
ln	Logaritmo natural.
log	Logaritmo vulgar.
m	Factor de superficie de los conductores.
msnm	Altura sobre el nivel del mar.
No.	Número.
n	número de subconductores de un haz.
P	Pérdidas de potencia producida por corona, kW o kW/km. Presión, en la ecuación general de los gases.
Q	Carga eléctrica, coulombios.
RI	Radio Interferencia.
R _o	Radio de un conductor de capacidad equivalente al haz.
RMG	Radio medio geométrico de un conductor, cm.
r	Radio de un círculo o cilindro.
S	Separación entre conductores.
T	Temperatura absoluta en la ecuación general de los gases.
V	Diferencia de potencia, kV.

C A P I T U L O I

E L E F E C T O C O R O N A

1.1 Naturaleza y manifestaciones de la corona.

Cuando se aplica un voltaje entre dos cuerpos conductores separados por un dieléctrico, el campo eléctrico en las superficies conductoras aumenta proporcionalmente con el voltaje aplicado, hasta llegar a un cierto punto en que la intensidad de campo superficial excede la rigidez dieléctrica del material aislante y éste se perfora; las descargas se producen en los sitios en que la intensidad de campo es máxima.

Este fenómeno se produce en dieléctricos sólidos o líquidos, de máquinas o cables aislados y en el aire, en la superficie de partes metálicas de aparatos y aisladores y finalmente en la superficie de conductores aéreos.

En el último caso, el voltaje es aplicado entre los conductores de las diferentes fases y entre los conductores y tierra, pero la máxima intensidad de campo se produce solo en los

conductores y es donde aparecen las descargas. En este caso, que el dieléctrico es el aire, las descargas se pueden producir indefinidamente sin deteriorar el aislamiento.

Este fenómeno toma el nombre de corona y se manifiesta por una luminiscencia blanco azulada alrededor de los conductores, por un zumbido característico semejante al de las frituras y por el típico olor a ozono; este efecto va acompañado de pérdidas de energía y oscilaciones electromagnéticas que afectan especialmente a las comunicaciones radiotelefónicas y de televisión.

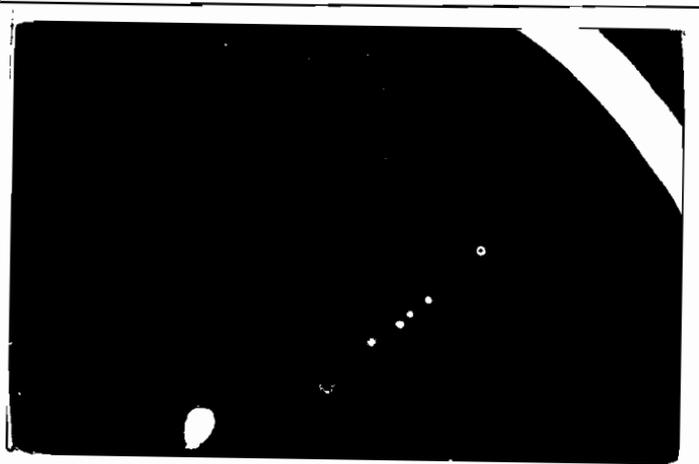
Limitando la corona a conductores de una línea de transmisión, la Asociación Americana de Standards, ASA, define a la corona como: "corona es una descarga luminosa debida a la ionización del aire circundante al conductor alrededor del cual existe un gradiente de potencial que excede un cierto valor crítico".

El efecto corona aumenta en importancia con el aumento de potencial, pero hay que anotar que no solo el potencial influye en él, sino que además hay factores atmosféricos y físicos que influyen en el efecto corona.

En el diseño de líneas de muy alta tensión el efecto corona influye mucho; básicamente de esto depende el tamaño de los conductores y la separación entre ellos, con este criterio se escogen conductores de sección transversal muy grande, lo que es una solución antieconómica; de manera que deben utilizar

se conductores huecos o conductores en haz, bundle.

El fenómeno de corona es muy complicado, se ha dicho que éste se manifiesta por una luminiscencia alrededor de los conductores; pero antes de llegar a este estado se producen al



Aspecto físico del conductor con tensión.

Oscilograma de la corriente de corona

Escalas:

vertical: .2 volt/div

horizont: 2 mseg/div.

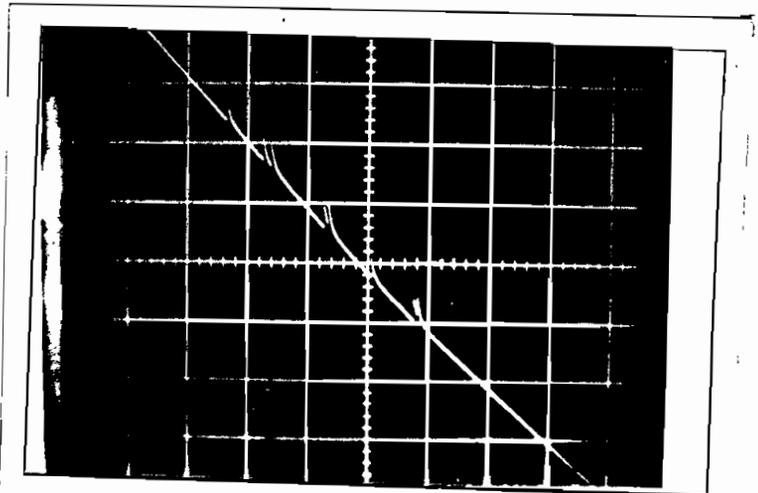


Fig. 1.1 Descargas Trichel producidas a 10 kV en un conductor cableado No. 6 AWG.

1

Bibliog.

gunos fenómenos que vale la pena mencionar.

Cuando el voltaje es más o menos $0,3 V_0$, siendo V_0 la tensión crítica, aparecen puntos luminosos, Fig. 1.1, que originan corrientes cuyos oscilogramas presentan en sus máximos una cresta muy regular en amplitud y período, son las denominadas descargas Trichel, (L1); cada una de ellas libera una carga de 10^{-11} coulombios, tienen una duración aproximada de un micro segundo y se manifiestan por una luminiscencia visible en la oscuridad en forma de conos azul-violeta.

Si se sigue aumentando la tensión, las descargas (*) aumentan uniformemente y se manifiestan por una segunda franja de puntos luminosos más intensos con una carga de 4×10^{-11} coulombios y la misma duración, ésta es la etapa Rudolph o corona de puntas, Fig. 1.2.

Aumentando más el voltaje, hasta $0,5 \dots 0,6 V_0$, aparecen descargas de algunos centímetros que se producen en las rugosidades del conductor, las cargas alcanzan valores de 3 a 30×10^{-11} coulombios, es aquí cuando aparece el ruido como de fritura, es la etapa de la corona de transición, Fig. 1.3.

Cuando se llega a la tensión crítica V_0 , a lo largo de todo el conductor aparecen efluvios que forman un manguito cilíndrico luminoso alrededor del conductor, éste estado toma el

(L1) Indicación del número de la referencia bibliográfica
(*) Ver apéndice B.

nombre de corona de manguito, Fig. 1.4.

Estas descargas se deben a la ionización del aire. Con el aire ionizado que rodea al conductor se forma un nuevo conductor de diámetro mayor que el original. Experiencias llevadas a cabo por Whitehead indican que el diámetro aparente del



Apariencia física
del conductor con
tensión.

Oscilograma de la
corriente de corona

Escalas:

vertical: .2 volt/div.

horizont: 2 mseg/div.

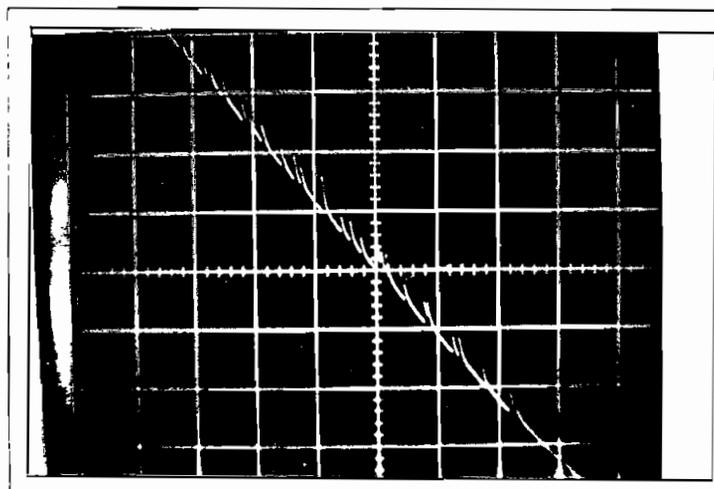
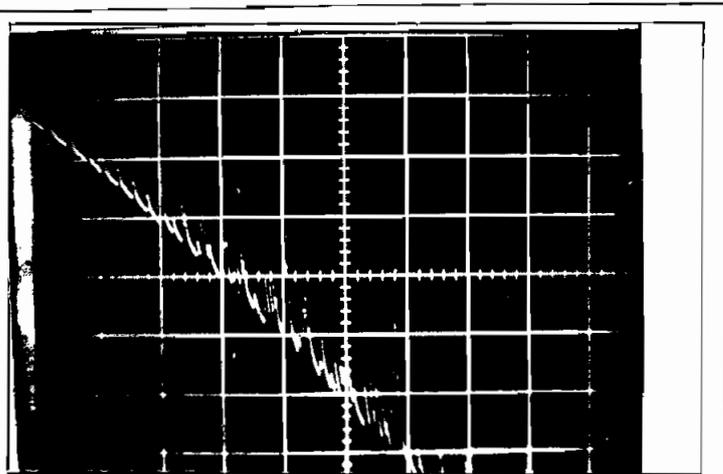
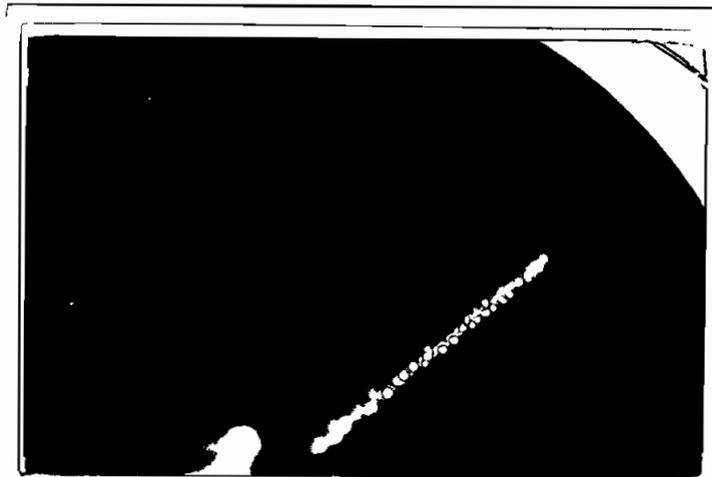


Fig. 1.2 Descargas Rudolph producidas a 13 kV
en un conductor cableado No. 6 AWG.

conductor con manguito luminoso es hasta 1,9 veces el diámetro real del conductor (Ll.1), a simple vista se diría que es exagerado ese valor, pero hay efluvios en la zona de los rayos ultravioleta, invisibles para el ojo humano.

Los deseos de transmitir grandes potencias con corrientes

Apariencia física del conductor con tensión.



Oscilograma de la corriente de corona
Escala:
vertical: .2 volt/div
horizontal: 2 mseg/div.

Fig. 1.3 Corona de transición producida a 18 kV en un conductor cableado No. 6 AWG.

Oscilograma de la corriente de corona
Escala:
vertical: .2 volt/div
horizontal: 2 mseg/div.

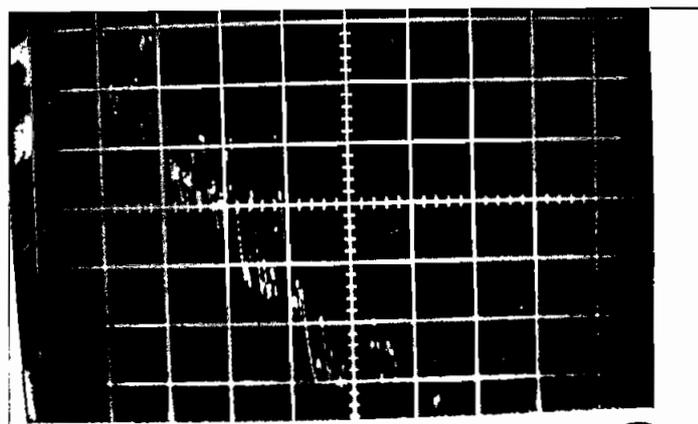


Fig. 1.4 Corona de manguito producida a 32 kV en un conductor cableado No. 6 AWG.

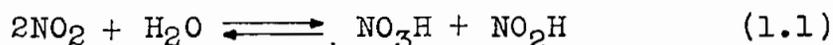
corriente alterna.

A un mismo nivel de tensión, las pérdidas por corona con corriente alterna son mayores que con corriente continua, a 60 cps, son del 200% al 400% mayores.

Con conductores lisos, el fenómeno de corona empieza aproximadamente con la misma tensión, tanto en el electrodo positivo como en el negativo, en forma de efluvios puros. En una superficie rugosa, se nota diferencia, produciéndose primero en el electrodo negativo.

La ionización del aire alrededor del conductor produce ozono O₃.

Los efluvios y chispas producen una combustión del aire, según la ecuación:



El ácido nítrico formado, NO₃H, corroe fuertemente al conductor y da lugar a la formación de sales cobrizas.

Mecánicamente la corona produce el "viento iónico" y la reacción mecánica producida por éste es capaz de desviar a los conductores, lo que origina oscilaciones mecánicas que se hacen visibles con la luminiscencia producida.

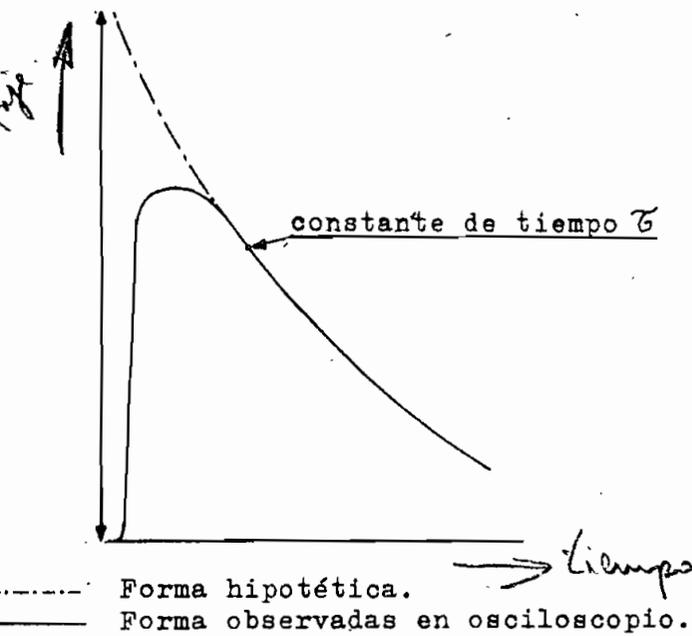
El efecto corona tiene su importancia por las pérdidas que lleva consigo y por los problemas de RI que ocasiona.

1.2 Cálculo de la magnitud de las descargas.

Se puede suponer que la forma de la onda de las descargas de corona es exponencial(L2), la magnitud de éstas está dado por:

$$\left| \int_0^{t_0} e \, dt \right| = \left| \int_0^{\infty} e' e^{-t/\tau} \, dt \right|$$

pero $\left| \int_0^{t_0} e \, dt \right| = 1/2 Z Q$



de tal manera que la altura de las descargas de corona es:

$$e' = Z Q / (2 \tau)$$

La ecuación anterior se puede escribir de diferente forma si se pone la impedancia en función de la inductancia y capacitancia del modelo por unidad de longitud.

$$Z = \sqrt{L/C} / C = 1 / (C v)$$

Reemplazando valores, para una onda exponencial se tiene:

ne:

$$e' = (Q) / (2 C v \tau)$$

(1.2)

1

1.3 Haces de conductores.

Un haz de conductores, bundle, es un conductor formado por dos, tres o más subconductores, Fig. 1.6. Estudios hechos por muchos investigadores concluyen que los haces no son económicos para voltajes de hasta 220 kV, pero para voltajes de 400 kV o más son la mejor solución.

1

Dieléctricamente esta configuración se comporta como un conductor de diámetro mucho mayor de tal manera que el diámetro de los subconductores es mucho menor que si se utilizara un conductor único.

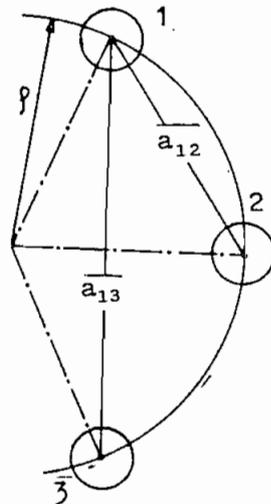


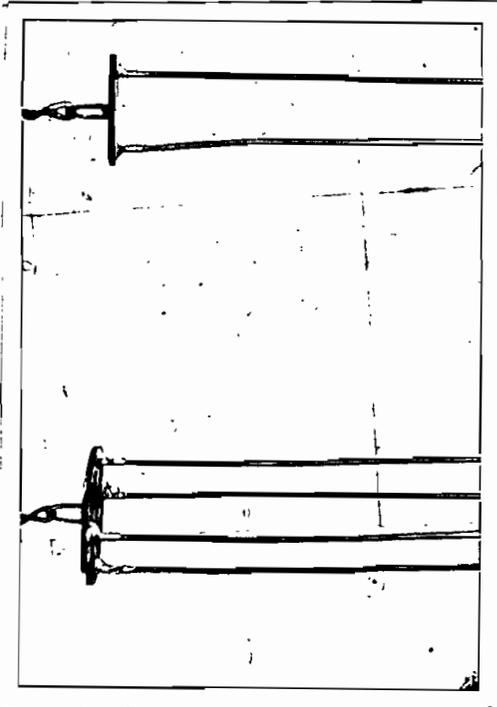
Fig. 1.6 Conductores en haz.

El diámetro aparente de los haces de conductores es función del número de subconductores y está definido por el radio medio geométrico del haz (L3).

$$RMG = \sqrt[n^2]{a_{11} a_{12} \dots a_{1n} a_{21} a_{22} \dots a_{2n} \dots a_{nn}} \quad (1.3)$$

Los haces de conductores ofrecen muchas ventajas aunque también algunas desventajas.

Entre las ventajas se puede mencionar un mayor voltaje disruptivo(L4), menor intensidad de campo eléctrico, incremento menos rápido de las pérdidas por corona y RI con el voltaje,



la impedancia característica es menor que de un conductor simple, por lo tanto, en las mismas condiciones se puede transmitir establemente mayor potencia. Estas ventajas pesan contra el costo del circuito y contra la sobrecarga por peso de nieve y escarcha que pueden ocasionar la rotura de los conductores y el enredo de ellos al desprenderse esta carga.

Fig. 1.7 Ejemplo de los haces preparados para las pruebas de laboratorio.

La experiencia indica que el tamaño de los subconductores es

el factor más importante para controlar el gradiente de potencial en haces de dos a cuatro subconductores. El espaciamiento entre subconductores también afecta al gradiente. El

Tabla T1.1 Diámetro del conductor de área equivalente para diferentes haces de conductores.
a = 10 d.

tamaño del subconductor	número de subconductores		
	2	3	4
12	9,2	21,1	20,0
10	11,6	26,6	25,3
8	14,6	33,6	31,8

unidades?

espaciamiento óptimo es de 8 a 10 veces el diámetro de los subconductores (L3.1).

1.4 Descargas en campos homogéneos producidos por electrodos cilíndricos.

Cuando un dieléctrico es sometido a la acción de un campo eléctrico que va en aumento, se llega a un valor de intensidad de campo que excede la rigidez dieléctrica del material y éste se perfora.

En el caso particular de dos cilindros coaxiales, si se somete el electrodo central a un voltaje creciente, cuando se sobrepasa la rigidez dieléctrica del aire aparece la ionización que produce una redistribución del campo eléctrico. Si el campo fuera perfectamente uniforme, la ionización empezaría en el aire, para una temperatura de 25°C y 760 mm de mercurio, cuando la intensidad de campo alcanza un valor de cresta de 30 kV/cm que corresponde a un valor eficaz de 21,1 kV/cm, para una onda sinusoidal.

Boulet y Jakubezyk(L5) han encontrado que la disrupción se produce cuando:

$$E \geq 0,447 \sqrt{s/r} \quad (1.4)$$

Si se hacen pruebas en un modelo cilíndrico, reduciendo la sección del electrodo central y midiendo el campo eléc-

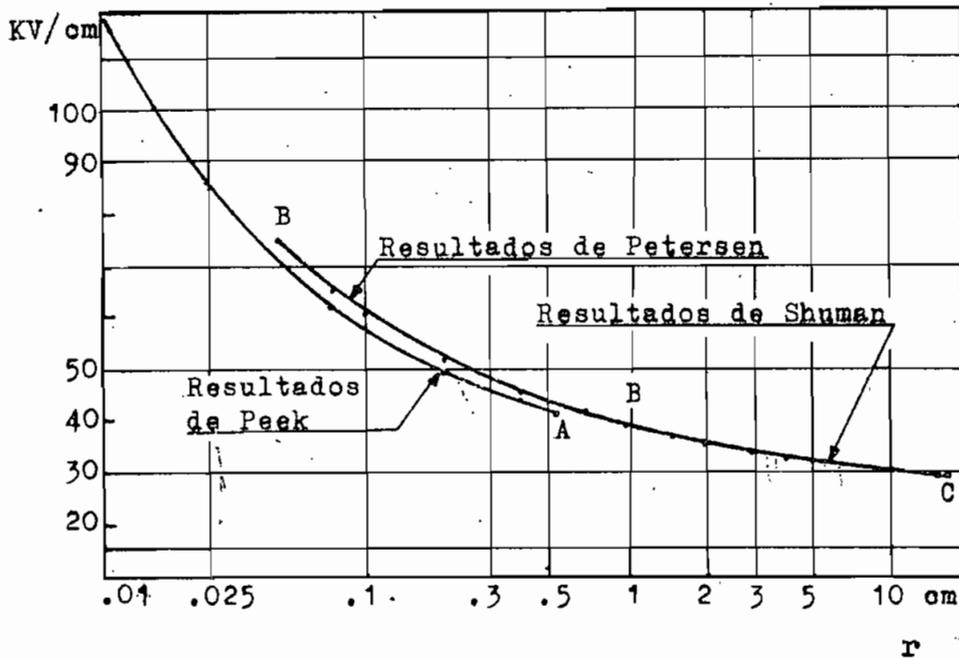


Fig. 1.8 Intensidad de campo inicial de descarga con tensión alterna 50 cps, en la superficie de un conductor cilíndrico al aire, en función del radio del hilo. 20°C y 760 mm Hg.

trico correspondiente a la iniciación de corona, se ve que este valor no es constante y que disminuye a medida que aumenta el diámetro del conductor. En la Fig. 1.8 se indican los resultados obtenidos por algunos investigadores; nótese que los resultados de Petersen casi coinciden con los de Peek, para radios pequeños (L.6), y que ellos tienden a 21,1 kV/cm que corresponde a la rigidez dieléctrica del aire.

Partiendo de la ley de Gauss se determina la intensidad de campo en la superficie del electrodo central. Para esto, primero se calcula la intensidad de campo en una superficie gaussiana entre dos cilindros concéntricos (L.7, L.8).

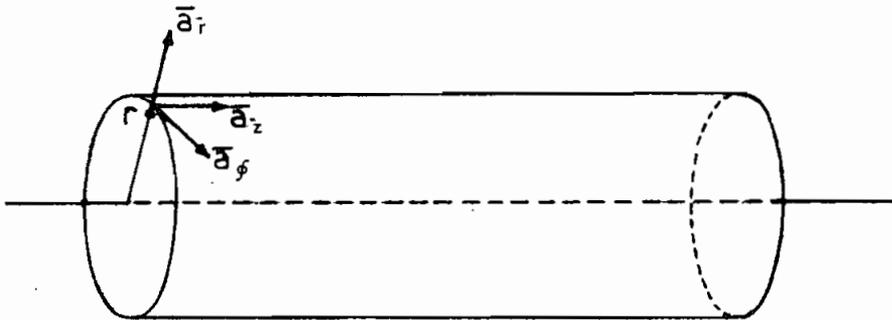


Fig. 1.9 Superficie Gaussiana.

$$\oint \vec{D} \cdot d\vec{S} = \int \rho_l dl \quad (1.5)$$

$$\mathcal{I} 1 = \int D_r \vec{a}_r \cdot dS \vec{a}_r + \int_{\text{base}} D_r \vec{a}_r \cdot dS \vec{a}_z$$

Por simetría solo subsisten las componentes radiales.

$$\mathcal{I} 1 = \int D_r \cdot dS$$

$$= \int_0^{2\pi} \int_0^l r d\phi dz D_r$$

$$= D_r r l 2\pi$$

$$D_r = \frac{\rho_l}{2 \pi r}$$

$$\vec{D} = \frac{\rho_l}{2 \pi r} \vec{a}_r$$

La densidad de flujo eléctrico y la intensidad de campo están ligados por la permitividad, en medios homogéneos e isótropos, de la siguiente manera:

$$\vec{D} = \epsilon \vec{E} \quad (1.6)$$

de manera que la magnitud de la intensidad de campo en una superficie gaussiana es:

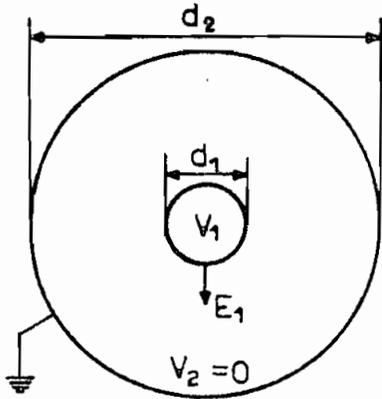


Fig. 1.10

perficie gaussiana es:

$$E = \frac{\rho_l}{2 \pi r \epsilon} \quad (1.7)$$

La diferencia de potencial entre los dos cilindros es:

$$\begin{aligned} V_1 &= V_{r_1} - V_{r_2} \\ &= \int \vec{E} \cdot d\vec{l} = \int_{r_1}^{r_2} \frac{\rho_l}{2 \pi r \epsilon} dr \\ &= \frac{\rho_l}{2 \pi \epsilon} \ln \frac{r_2}{r_1} \end{aligned}$$

de donde la intensidad lineal de carga es:

$$\rho_l = \frac{2 \pi \epsilon V_1}{\ln (r_2/r_1)} \quad (1.7a)$$

La carga del electrodo central es:

$$Q = \rho_l l = \frac{2 \pi \epsilon V_1 l}{\ln (r_2/r_1)}$$

La capacitancia es la relación de la carga a la diferencia de potencial.

$$\begin{aligned} |C| &= \frac{|Q|}{|V|} \\ &= \frac{2 \pi \epsilon V_1 l}{\ln (r_2/r_1)} \cdot \frac{1}{V_1} = \frac{2 \pi \epsilon l}{\ln (r_2/r_1)} \end{aligned}$$

$$C = \frac{2 \pi \epsilon' l}{\ln (d_2/d_1)} \quad (1.8)$$

Despejando la densidad lineal de la ecuación 1.7 e igualando a la ecuación 1.7a, se tiene:

$$2 \pi r_1 \epsilon E = \frac{2 \pi \epsilon V_1}{\ln (r_2/r_1)}$$

De aquí, la magnitud de la intensidad de campo es:

$$\begin{aligned} E &= \frac{V_1}{r_1 \ln (d_2/d_1)} \\ &= \frac{2 V_1}{d_1 \ln (d_2/d_1)} \end{aligned} \quad (1.9)$$

que es la intensidad de campo en la superficie del electrodo central.

El gradiente crítico de iniciación de corona está dado por(L5):

$$E_0 = 31 \text{ m } \partial \left[1 + \frac{0,436}{\sqrt{\partial d_1}} \right] \quad (1.10)$$

y el voltaje con que se inicia la corona viene dado por:

$$V_0 = E_0 \left(\frac{d_1}{2} \right) \ln \left(\frac{d_2}{d_1} \right) \quad (1.11)$$

Las descargas de corona se producen en las irregularidades de los conductores energizados con un voltaje que depende de la forma de estas irregularidades, pero el cual casi siem

pre es menor que el voltaje crítico teórico para un conductor limpio, de manera que la superficie de los conductores es una condición muy importante y debe ser tomada en cuenta adecuadamente mediante un coeficiente. Las condiciones superficiales a menudo mejoran cuando el conductor ha estado un tiempo en servicio.

Cuando el electrodo central está constituido por un haz de conductores, la capacidad del modelo está dada por (L9):

①

$$C = \frac{2 \pi \epsilon l}{\ln (r_2 / r_0)} \quad (1.12)$$

$$r_0 = \sqrt[n]{n \cdot r} \rho^{n-1} \quad (1.12a)$$

Por ejemplo, para:

$$n = 2 \quad r_0 = \sqrt{2 r}$$

$$n = 3 \quad r_0 = \sqrt[3]{3 a^2 r}$$

$$n = 4 \quad r_0 = \sqrt[4]{4 a^3 r}$$

En los haces de conductores, debido a la influencia mutua de los subconductores, la intensidad de campo superficial no es

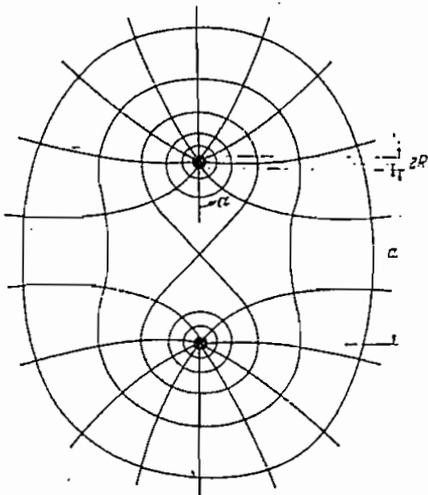


Fig. 1.11 Forma del campo en un haz de dos subconductores.

uniforme y varía cosenoidalmente desde un máximo en la superfi

cie exterior en la línea de los centros, hasta un mínimo en la superficie interna. Este efecto modifica el comportamiento de la corona en un haz de conductores en el que el voltaje de iniciación de corona corresponde a un valor que puede ser esperado a partir de los cálculos, pero donde el incremento de la corona con el voltaje es menor que para un conductor sencillo.

Del número de subconductores del haz depende que la distribución del campo sea más o menos homogénea, Fig.1.12.

Para un haz de dos subconductores, el máximo gradiente superficial está dado por(1.10):

$$E = V m \delta^{2/3} \frac{1 + 2 r / a}{2 r \ln (S/\sqrt{r a})} \quad (1.13)$$

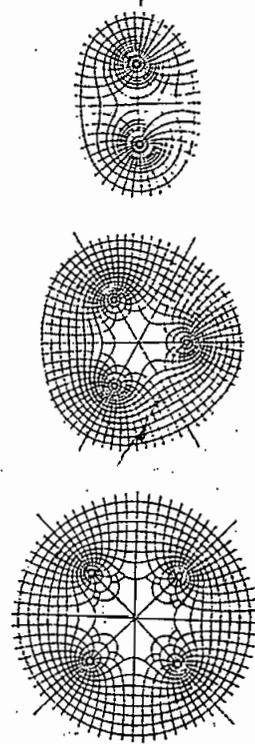


Fig. 1.12 Distribución del campo en diferentes haces.

1.5 Pérdidas.

Con el progreso de la ciencia y de la técnica, cada día se conoce más sobre el fenómeno de corona; sin embargo, el conocimiento actual es incompleto y representa el esfuerzo de estudio y experimentos de muchos investigadores.

Los resultados a los que han llegado son fórmulas experimentales que permiten calcular aproximadamente las pérdidas por corona.

Las investigaciones de Peek dicen que en la corona influyen variables eléctricas, atmosféricas y geométricas.

Billing

Dentro de los factores físicos intervienen el diámetro de los conductores, el mismo que puede ser el diámetro físico, cuando se utiliza un solo conductor por fase o el diámetro aparente cuando se utilizan conductores en haz; el estado de la superficie de los conductores, la separación entre ellos y la disposición física de los mismos.

En los factores atmosféricos interviene la situación geográfica de la zona donde va la línea (altura sobre el nivel del mar), temperatura ambiental, humedad, lluvia, viento, nieve, niebla, etc.

Del estado de la superficie depende la mayor o menor intensidad superficial de campo, los conductores más delgados dan lugar a una mayor intensidad de campo.

Lo mismo sucede con los conductores cableados; según el

tipo de cableado la superficie de los conductores es más o menos irregular y según esto la intensidad de campo superficial es menor o mayor.

Los conductores cableados formados con conductores cilíndricos, tienen una sección transversal limitada por arcos de círculo, cada uno de aquellos tiene un radio mucho menor que el conductor total, lo que da como resultado una intensificación del campo superficial.

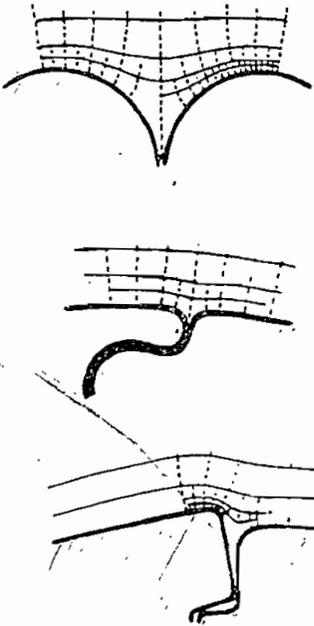


Fig. 1.13 Campo superficial en conductores con diferentes formas de cableado.

Investigaciones efectuadas por Butterworth han demostrado que cuando el número de hilos de la última capa es mayor que seis, el campo máximo es un 33% mayor que el que se tiene en un conductor cilíndrico de radio promedio igual al del conductor cableado(L11).

El factor de superficie m , está definido por el producto de dos coeficientes: el uno, m_f , que toma en cuenta la forma general de la sección del conductor y el otro, m_s , que toma en cuenta el estado de la superficie del cable.

$$m = m_f \cdot m_s$$

(1.14)

Tabla Tl.2 Valores típicos representativos de la forma y estado de la superficie de los conductores (Ll2).

m_1	forma general del conductor
1,00	sección perfectamente circular
0,85	Cable con 6 hilos en la capa exterior
0,90	Cable con 12 -30 hilos en la capa ext.
m_2	estado de la superficie del conductor
0,90	Conductores limpios o envejecidos
0,80	Conductores nuevos.
0,70	Conductores sucios o engrasados.
0,5 0,3	Conductores con gotas de agua.

La presión atmosférica y la temperatura se consideran al calcular la densidad relativa del aire. Los investigadores anotan que este factor influye directamente o con un exponente dos tercios en el voltaje crítico disruptivo así como en las pérdidas.

La ecuación general de los gases dice que:

$$\frac{P V}{T} = \text{constante} \quad (1.15)$$

que es lo mismo que escribir:

$$\frac{P_1 V_1}{T_1} = \frac{P_2 V_2}{T_2}$$

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{P_2}{P_1} \cdot \frac{T_1}{T_2} \quad (1.15a)$$

la relación de volúmenes define a la densidad relativa del aire:

$$\delta = \frac{V_1}{V_2} = \frac{P_2}{P_1} \cdot \frac{T_1}{T_2} \quad (1.15b)$$

reemplazando valores para las condiciones normalizadas, 20°C y 760 mm Hg, se tiene que:

$$\delta = \frac{b}{273 + t} \cdot \frac{273 + 20}{760} = \frac{293}{760} \cdot \frac{b}{273 + t}$$

$$\delta = \frac{0.386}{\cancel{3.86}} \frac{b}{273 + t} \quad (1.16)$$

Hay que anotar que la densidad relativa del aire, calculada con la ecuación anterior es correcta solo para presiones comprendidas entre 760 y 700 mm Hg aproximadamente. ①

Witehead determinó que la densidad relativa del aire, para diferentes valores de presión, hay que corregirla según la siguiente ecuación (L.13):

$$k = \frac{30 \delta \cdot (1 + 0,33/\sqrt{\delta r})}{30 \cdot (1 \mp 0,33/\sqrt{r})}$$

$$k = \frac{\sqrt{\delta} + 3 \delta \sqrt{r}}{1 + 3 \sqrt{r}} \quad (1.17)$$

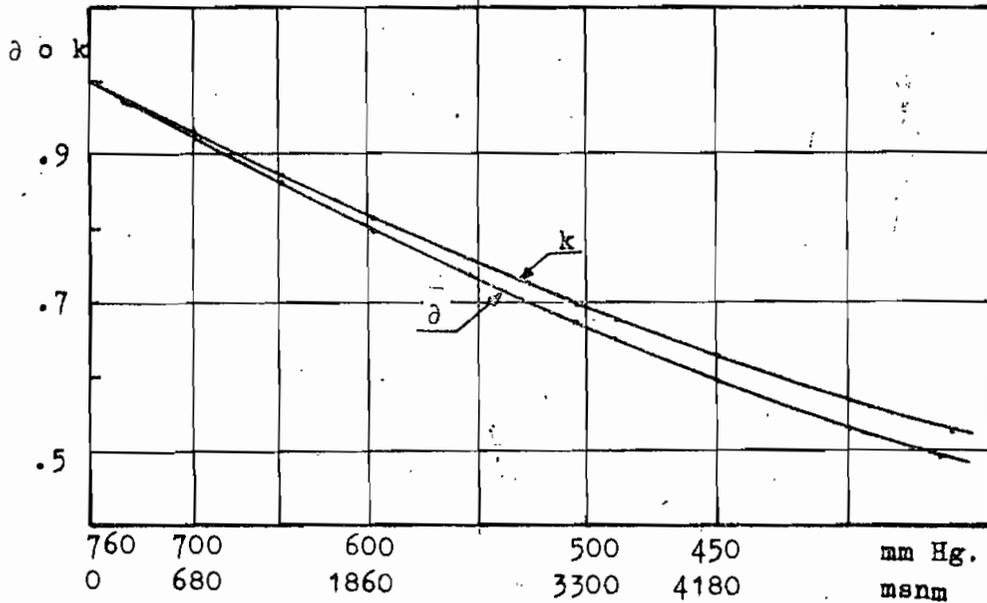


Fig. 1.14 δ y k calculados para un conductor No. 6 AWG.

Srtigel saca la conclusión de que el material del que están hechos los conductores no afecta a la corona.

Bibliografía?

La mayor parte de ensayos han sido realizados en buen tiempo; pero de las pocas pruebas hechas con lluvia o nieve, se deduce que con el mismo nivel de voltaje, en mal tiempo las pérdidas se incrementan hasta en un 50% o las mismas pérdidas que se tienen en buen tiempo aparecen con un voltaje menor, más o menos el 65% del que se tenía en buen tiempo. De manera que se puede concluir que en tiempo húmedo el efecto corona, pérdidas y RI, es más intenso que en tiempo seco.

La cantidad de factores que afectan al efecto corona hacen que su estudio sea muy complejo.

La fórmula de Peek para el cálculo de las pérdidas dice que éstas son función de la densidad relativa del aire, de la frecuencia, del diámetro de los conductores, de la separación entre ellos, del voltaje de la línea y del voltaje crítico disruptivo, o sea que se puede escribir así:

$$P = f_{ne} (\rho, f, S, d, V, V_0) \quad (1.18)$$

De lo anterior se deduce que hay tres parámetros con los que se puede controlar la corona: el voltaje de la línea, el tamaño de los conductores y la separación entre ellos.

Generalmente, el voltaje se fija a base de otras consideraciones; pero con el diámetro de los conductores y la separación entre ellos se pueden hacer diferentes combinaciones para tener corona en un nivel aceptable. Lo ideal es aumentar el tamaño de los conductores y la separación entre ellos; pero hasta un cierto límite, para no llegar a un diseño antieconómico. El problema del diámetro de los conductores se puede solucionar utilizando conductores huecos o conductores en haz, solución propuesta en 1911 por Faccioli, que dan un conductor ficticio de diámetro mayor que el diámetro de los subconductores del haz.

Billing?

1.6 Radio Interferencia.

El fenómeno de corona origina perturbaciones de alta frecuencia que se manifiestan en los receptores de radio, teléfono y TV. Estas perturbaciones se producen en los puntos luminosos y en los penachos y se extienden por el espacio como oscilaciones electromagnéticas. Esto se produce de dos maneras: la una, por radiación directa y la otra, como propagación a lo largo de la línea. Las primeras se amortiguan rápidamente con la distancia, aproximadamente, son inversamente proporcionales a la distancia.

Probablemente la radio interferencia es lo más importante en el efecto corona; a menudo, a base de la radio interferencia hay que dimensionar los conductores, únicos o haces, para evitar en lo posible la interferencia en las líneas de comunicación cercanas a la línea de transmisión.

La radio interferencia aumenta muy rápidamente con el incremento del gradiente superficial del conductor.

1.6.1 Fuentes de radio interferencia (L.14).

La corona se manifiesta primero con el apareamiento de las descargas Trichel que son impulsos regulares en magnitud y período, pero no poseen un campo de interferencia detectable.

En la etapa de la corona de puntas o etapa Rudolph se inicia la radio interferencia producida por el efecto corona.

La radio interferencia producida por el semiciclo negativo se mantiene débil, pero la producida en el semiciclo positivo intensifica el campo perturbador.

1.6.2 Medida de la RI.

La radio interferencia producida en una línea de alta tensión debe medirse a una distancia estándar desde el centro del circuito.

En Europa se ha estandarizado que las medidas de RI deben ser hechas a 20 m medidos radialmente desde el conductor externo. En Estados Unidos, en cambio, la distancia se ha estandarizado en 15m medidos horizontalmente debajo del conductor externo. (L.14.1).

Actualmente se utilizan dos tipos de medidores de RI, el medidor rms y el medidor quasi-peak.

En la Fig. 1.15 se indica el diagrama de bloque de un medidor generalizado de RI.

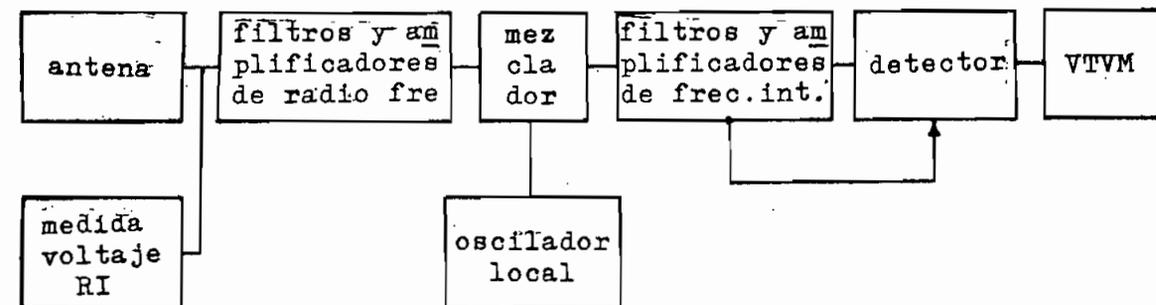


Fig. 1.15 Diagrama de bloque de un medido de RI.

1.7 Generación del ruido de corona. (L.27)

Las descargas de corona se producen en los picos de voltaje, positivo y negativo, cuando el gradiente en el conductor excede un cierto valor crítico. El ruido producido en el pico positivo es mucho más fuerte que el producido por las descargas negativas, generalmente este último puede ser despreciado cuando se estima el ruido de corona.

Las fuentes de corona están distribuidas a lo largo del conductor y cada una de ellas produce un tren de impulsos que varían en intensidad, forma y separación de tiempo.

La carga asociada con los impulsos positivos fuertes se estima que es del orden de 10^{-9} a 10^{-8} coulombios.

Midiendo el espectro de frecuencia del ruido producido por fuentes artificiales de corona y algunos observados en líneas largas, indican que los impulsos de ruido son de tipo exponencial:

$$V = V_0 (e^{-\alpha t} - e^{-\beta t}) \quad (1.19)$$

El valor cualitativo del ruido es un parámetro muy importante cuando se quiere predecir el comportamiento de una línea de alto voltaje en lo que se refiere al comienzo de RI.

En este parámetro no solo interviene el gradiente superficial del conductor sino algunos otros factores como el clima, las condiciones superficiales del conductor, etc.

1.8 Modelo coaxial.

El objeto de la presente tesis es conocer más a fondo el problema del efecto corona, principalmente la parte relacionada con las pérdidas.

El estudio del efecto corona puede ser hecho por diferentes métodos: en líneas de prueba construidas especialmente con este fin o en modelos cilíndricos, este último tiene la ventaja de dar facilidades para simular condiciones atmosféricas arbitrarias, a la vez que se puede fácilmente probar diferentes tipos de conductores, además de que el costo es mucho menor; naturalmente, antes de hacer pruebas o comentarios es necesario conocerle perfectamente al modelo disponible.

Por las facilidades que ofrece el estudio será hecho en un modelo cilíndrico construido especialmente con este fin(*).

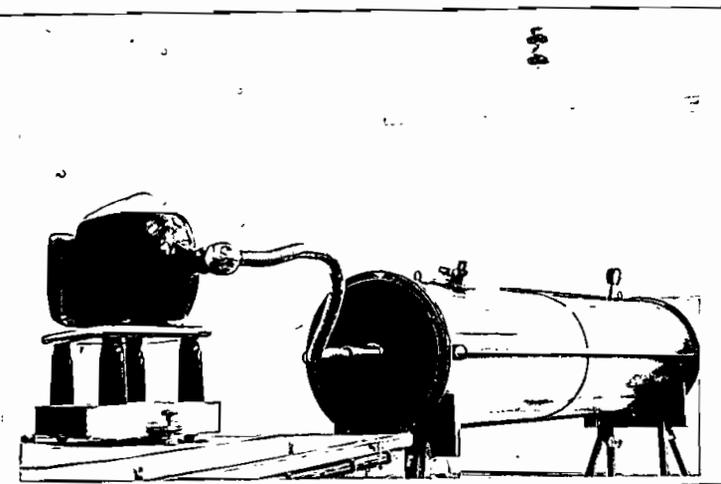


Fig. 1.16 Modelo cilíndrico de pruebas.

(*) Ver apéndice A.

Dicho modelo está formado por un cilindro metálico exterior de 60 cm de diámetro y un conductor coaxial interno, con una longitud útil de 2,5 metros; el conductor central variará entre 2,58 mm y 15,6 mm de diámetro, también se utilizarán ha-

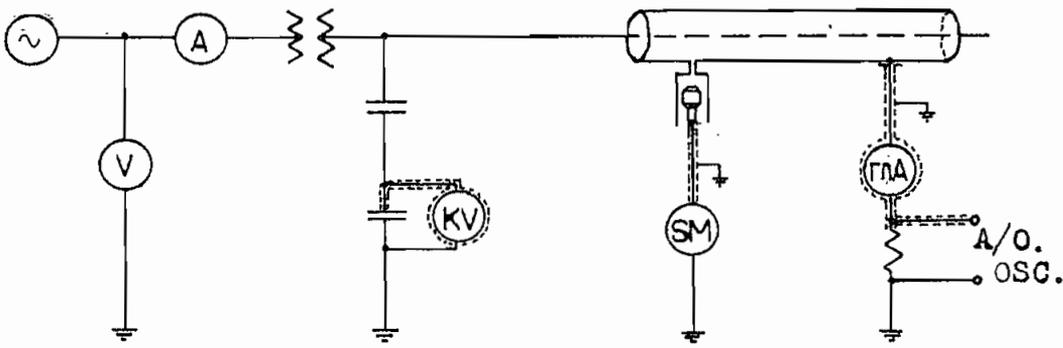


Fig. 1.17 Detalle del circuito utilizado en las pruebas de corona.*

ces de conductores con 2, 3 y 4 subconductores, los mismos que tendrán diámetros entre 2,053 y 3,264 mm.

El circuito empleado en las pruebas de corona puede ser simplificado en un circuito equivalente en el que se puedan simular perfectamente las pérdidas por corona.

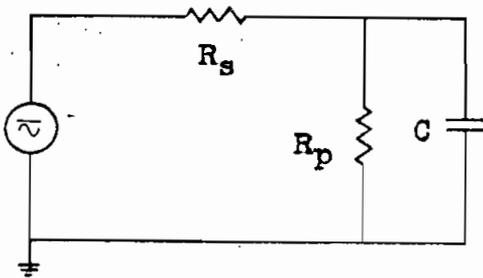


Fig. 1.18 Circuito equivalente.

El efecto Joule del circuito exterior al modelo está representado por la resistencia serie R_s .

Debido a que todo capacitor real tiene un factor de potencia

(*) ver apéndice C.

diferente de 0, en paralelo con el capacitor ideal C hay que representar una resistencia R_p que simula las pérdidas de potencia.

Si las pérdidas parásitas de potencia son despreciables, en el circuito equivalente se puede omitir la resistencia serie R_s .

Un capacitor real se asemeja más al ideal cuando la potencia activa es muy pequeña comparada con la potencia reactiva del mismo. La relación de la potencia reactiva a la potencia activa define la calidad del capacitor.

$$Q = \text{VAR} / P \quad (1.20)$$

pero: $\text{VAR} = V I \sin \phi$

$$P = V I \cos \phi$$

reemplazando valores:

$$Q = V I \sin \phi / V I \cos \phi = \text{tg } \phi \quad (1.20a)$$

En el capacitor ideal el ángulo ϕ es igual a 90° , pero en el real es menor que 90° , el ángulo complementario, δ , toma el nombre de ángulo de pérdidas.

$$\delta = 90 - \phi \quad (1.21)$$

de manera que la calidad del capacitor también se define como:

$$Q = \operatorname{tg} (90 - \delta) = 1 / \operatorname{tg} \delta \quad (1.20b)$$

El valor $\operatorname{tg} \delta$ se denomina factor de pérdidas.

En el circuito equivalente, el factor de pérdidas viene dado por:

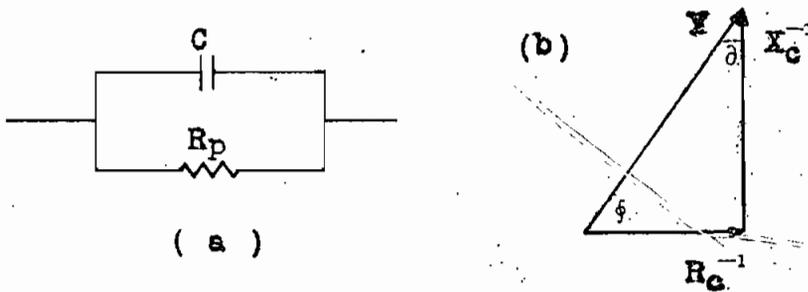


Fig. 1.19

$$\begin{aligned} \operatorname{tg} \delta &= (1/R_p) / (1/X_c) = X_c / R_p \\ &= (R_p \omega C)^{-1} \end{aligned} \quad (1.22)$$

despejando R_p :

$$R_p = (\omega C \operatorname{tg} \delta)^{-1} \quad (1.23)$$

La resistencia en paralelo que simula las pérdidas por corona también puede ser calculada conociendo corriente y voltaje:

$$\begin{aligned} Y &= I / V = 1/R + j/X_c \\ G &= (I / V) \cos \phi \\ R_p &= V / (I \cos \phi) \end{aligned} \quad (1.23a)$$

Las pérdidas producidas en la resistencia paralelo son:

$$\begin{aligned} P &= \text{VAR} \operatorname{tg} \theta \\ &= V^2 \omega C \operatorname{tg} \theta = V^2 \omega C (R_p \omega C)^{-1} \\ &= V^2 / R_p \end{aligned}$$

Reemplazando valores se llega a la ecuación que define la potencia en un circuito cualquiera.

$$P = V^2 / (V / I \cos \phi) = V \cdot I \cos \phi \quad (1.24)$$

La corriente se deforma con el aumento del voltaje y es producida por la inductancia presente en el circuito, de manera que para representar este efecto en el circuito equivalente se debe incluir una inductancia en serie. (1)

Con el aumento del voltaje varía la capacitancia y la resistencia paralelo R_p (*). Para representar esta variación de C y R_p , estos parámetros del circuito equivalente deben representarse como elementos variables.

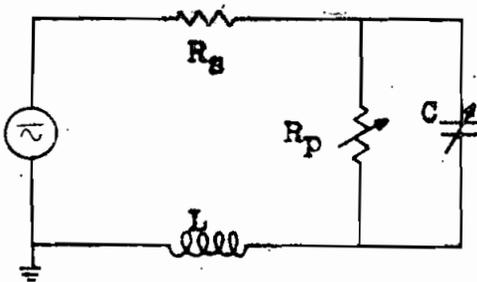


Fig. 1.20 Circuito equivalente.

C A P I T U L O I I

P R U E B A S E N E L M O D E L O

2.1 Capacitancia del modelo.

Para conocer exactamente la variación de la capacidad del modelo, en función del tamaño del electrodo central, se calculará utilizando las ecuaciones 1.8 y 1.12a y a base de medidas de corriente y voltaje efectuadas en el laboratorio.

El cálculo a base de las ecuaciones anteriormente indicadas se hace con un computador digital. La tabla T2.1 muestra los resultados obtenidos por este procedimiento.

Analizando los resultados se puede ver que la capacidad del modelo es función del diámetro del electrodo central. Esta proporcionalidad se mantiene incluso con los haces de dos y tres subconductores, pero disminuye la capacidad con el haz de cuatro subconductores, esto es justificable debido a que el haz de cuatro subconductores da un conductor equivalente, de área menor que la equivalente a la de un haz de tres subconductores;

1

*ONE WORD INTEGERS
 FEATURES SUPPORTED
 ONE WORD INTEGERS
 IOCS

CORE REQUIREMENTS FOR
 COMMON 0 VARIABLES 38 PROGRAM 514

END OF COMPIIATION

ESCUELA POLITECNICA NACIONAL
 PATRICIO ORBE GARCÉS

PRUEBAS SOBRE EFECTO CORONA

AWG	DIAMETRO CM	CAPACIDAD UUF	CAPACIDAD UUF	CAPACIDAD UUF	CAPACIDAD UUF
12	0.2053	27.8865	39.8667	53.0131	52.4322
10	0.2588	29.2471	42.7070	58.1000	57.4580
8	0.3264	30.7473	45.9831	64.2668	63.5495
6	0.4116	32.4098	---	---	---
4	0.5190	34.2622	---	---	---
2	0.6545	36.3393	---	---	---
0	0.8253	38.6845	---	---	---
20	1.0407	41.3532	---	---	---
30	1.1686	42.8306	---	---	---
40	1.3123	44.4174	---	---	---

Tabla T2.1 Resultados obtenidos en el computador para la capacidad del modelo.

la diferencia es pequeña, pero existe.*

Esta es una de las razones para que económicamente no sea conveniente utilizar haces de muchos subconductores.

En todos los casos se puede ver que la capacitancia es del orden de los pico faradios, lo que significa una impedancia sumamente alta a la frecuencia de 60 cps, que permite representar a la capacitancia del modelo, en el circuito equivalente, como un circuito abierto.

Conforme aumenta la corona, la capacidad del modelo aumenta debido a las siguientes causas: primero, a que el diámetro del conductor central aumenta proporcionalmente a la ionización ya que la capacidad es proporcional al diámetro del electrodo central, ecuación 1.8, y segundo, porque el dieléctrico se altera con la ionización producida y porque disminuye la separación entre los electrodos.

2.2 Intensidad de campo superficial.

Se ha visto que la intensidad de campo es inversamente proporcional al diámetro de los conductores, a través de las pruebas de laboratorio se va a comprobar estos resultados con los electrodos disponibles.

Utilizando la ecuación 1.10 se hace el cálculo de la intensidad crítica inicial de corona y utilizando la ecuación

(*) Ver capítulo I 1.3.

PRUEBAS SOBRE EFECTO CORONA

FACTOR DE RUGOSIDAD 0.900 FRECUENCIA 60.00 CPS
 PRESION 40.0 CMHG TEMPERATURA 18.0 GRADOS CENTIGRADOS

AWG	DIAMETRO CM	GRADCRIT KV/CM	VOLTCRIT KV	GRADCRIT KV/CM	RELACION KV/CM
12	0.2053	34.3589	17.5800	213.5723	7.6416
10	0.2588	32.2181	19.8196	169.6712	6.8051
8	0.3264	30.3116	22.3659	134.8560	6.0601
6	0.4116	28.6139	25.2576	107.2463	5.3967
4	0.5190	27.1020	28.5354	85.3507	4.8059
2	0.6545	25.7556	32.2404	67.9867	4.2797
0	0.8253	24.5566	36.4119	54.2164	3.8112
20	1.0407	23.4889	41.0839	43.2961	3.3940
30	1.1686	22.9997	43.6154	38.7152	3.2028
40	1.3123	22.5380	46.2794	34.6358	3.0224

FACTOR DE RUGOSIDAD 0.900 FRECUENCIA 60.00 CPS
 PRESION 76.0 CMHG TEMPERATURA 18.0 GRADOS CENTIGRADOS

AWG	DIAMETRO CM	GRADCRIT KV/CM	VOLTCRIT KV	GRADCRIT KV/CM	RELACION KV/CM
12	0.2053	55.0819	28.1830	213.5723	7.6416
10	0.2588	52.1309	32.0694	169.6712	6.8051
8	0.3264	49.5031	36.5267	134.8560	6.0601
6	0.4116	47.1629	41.6309	107.2463	5.3967
4	0.5190	45.0788	47.4631	85.3507	4.8059
2	0.6545	43.2230	54.1057	67.9867	4.2797
0	0.8253	41.5703	61.6393	54.2164	3.8112
20	1.0407	40.0985	70.1354	43.2961	3.3940
30	1.1686	39.4242	74.7619	38.7152	3.2028
40	1.3123	38.7879	79.6466	34.6358	3.0224

ec. 1.10

ec. 1.11

ec. A.1

ec. 1.4

Tabla T2.2 Resultados obtenidos en el computador para el voltaje y gradiente críticos.

1.11 se obtiene el voltaje crítico de iniciación de corona que se puede comparar con el medido en el laboratorio.

El cálculo a base de las ecuaciones se hace en un computador digital; las medidas en el laboratorio se hacen en el osciloscopio de rayos catódicos(*), donde se ve con que voltaje se inician los efluvios de la corona de transición en la onda de corriente. Este voltaje se mide por ser quizás el más fácil ya que simultáneamente se presenta el ruido como de fritura. Conociendo este voltaje fácilmente se puede determinar el voltaje de iniciación de corona.

Las pruebas en el laboratorio se hacen con todos los electrodos disponibles, con diferentes presiones, voltajes y frecuencias.

Los resultados obtenidos por el método analítico son muy confiables debido a que han sido considerados todos los factores que influyen directamente en la intensidad de campo superficial; ellos son: la densidad relativa del aire, el factor de superficie de los conductores y el tamaño de los mismos.

En la Tabla T2.2 se pueden comparar los resultados obtenidos analíticamente.

Se observa que el gradiente crítico desciende con el aumento del diámetro del electrodo central y que la intensidad de campo superficial tiende a un cierto valor límite cuando el

(*) Ver apéndice C.

diámetro del electrodo central tiende a infinito, ese valor límite de intensidad de campo, $21,1 \text{ kV}_{ef}/\text{cm}$, corresponde a la rigidez dieléctrica del aire.

También se puede observar que se cumple la relación de terminada por Boulet y Jakubezyk, ecuación 1.4, en todos los casos la intensidad de campo es mayor que $0,447 \sqrt{s/r}$.

En la Fig. 2.1a se puede ver que los resultados calcu-lados son mayores que los obtenidos por Peek y Petersen, estos últimos también fueron conseguidos en un modelo coaxial, pero no hay indicación de las dimensiones del modelo utilizado por esos investigadores.

Observando la Fig. 2.1b, se ve que la curva de voltaje medida en el laboratorio está entre las curvas calculadas para conductores de $m = 0,9$ y $m = 0,75$; con mucha aproximación se puede decir que los voltajes medidos corresponden a conductores con un factor de superficie $m = 0,8$, esto es correcto ya que los valores en mención fueron obtenidos con conductores sólidos nuevos, cuyo factor de superficie es $0,8$.(*)

De lo anteriormente indicado se desprende que los resultados obtenidos en el laboratorio concuerdan con los resultados dados por la ecuación 1.11.

(*) Ver Tabla T1.2

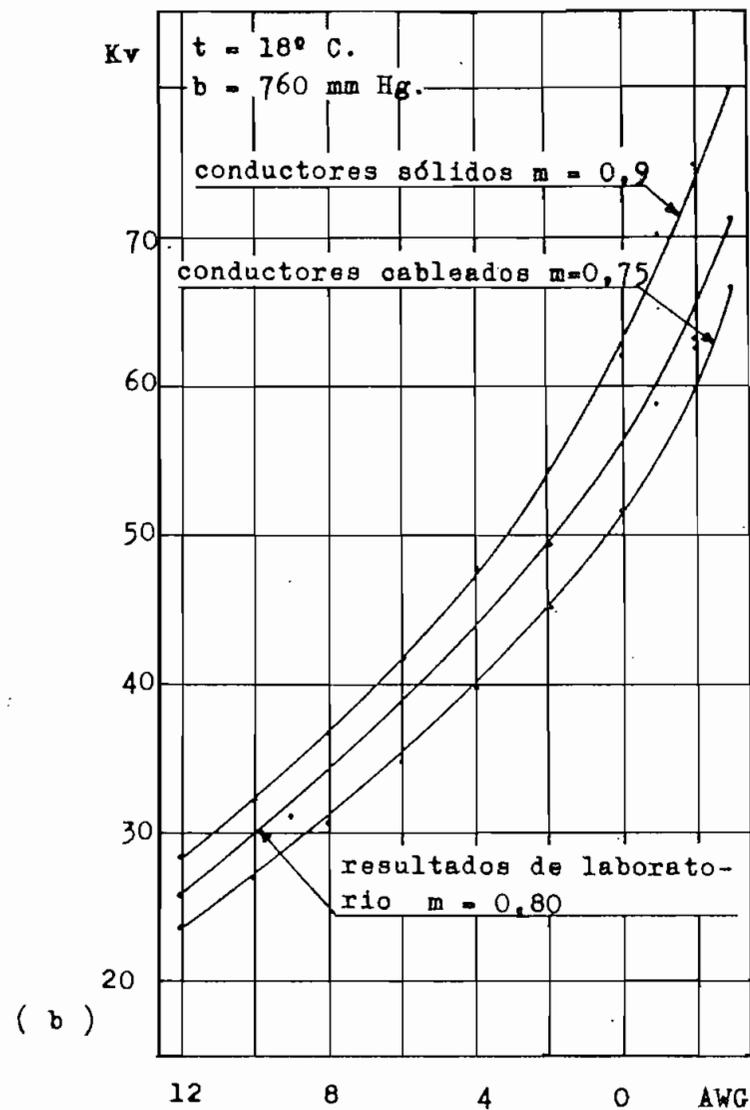
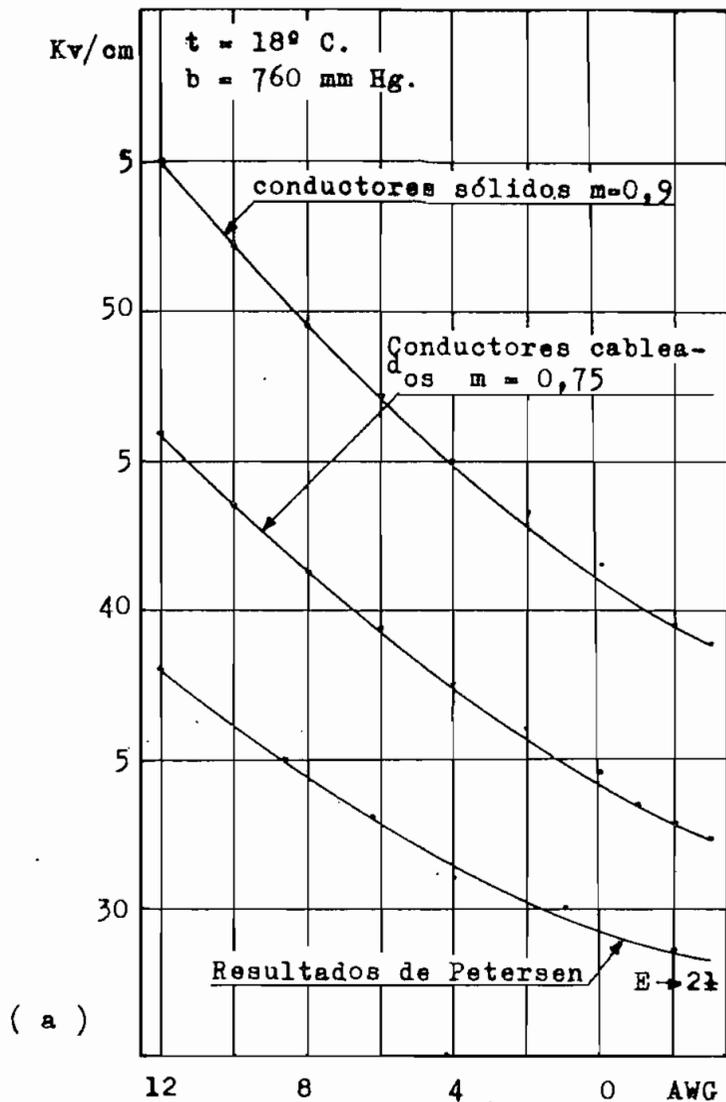


Fig. 2.1 Intensidad de campo y voltaje crítico calculados con las ecuaciones del Cap. I y voltaje crítico medido en el laboratorio.

2.3 Pérdidas.

La ecuación de Feek para el cálculo de las pérdidas por corona dice que éstas son función de la densidad relativa del aire, de la frecuencia, de la separación entre electrodos, del diámetro de los mismos, del voltaje de iniciación de corona y del voltaje de prueba.

En el laboratorio se hacen pruebas variando cada uno de los factores que influyen en la corona para conocer exactamente como interviene cada uno de ellos.

Antes de realizar las pruebas se han estudiado cuidado

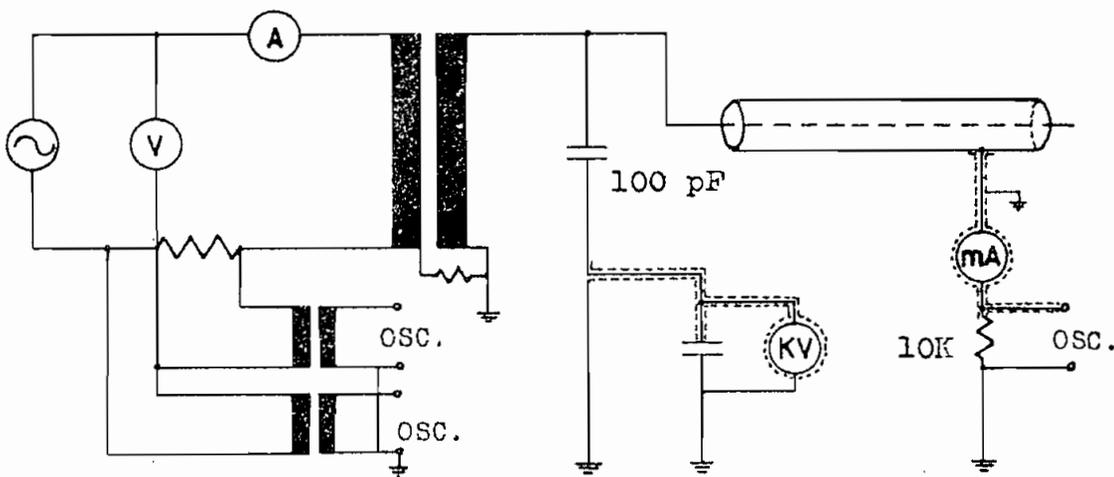


Fig. 2.2 Detalle del circuito de medida para pruebas de efecto corona con corriente alterna.*

(*) Ver apéndice C para conocer la equivalencia de los símbolos utilizados en los instrumentos.

samente los circuitos de medida, para que los resultados que se obtengan sean el fiel reflejo del comportamiento del modelo.

Todas las pruebas con corriente alterna se hacen hasta 50 kV, ya que con esta tensión se está muy cerca del punto en que aparece corona en los bushings del modelo.

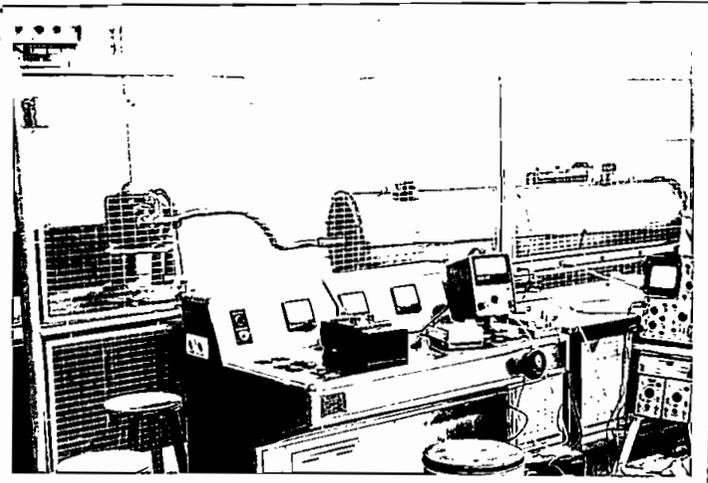


Fig. 2.3 Disposición física de los equipos de medida.

En la Fig. 2.2 se ve la conexión de los instrumentos de medida; se disponen voltímetros y amperímetros tanto en el circuito primario como en el secundario del transformador, el único objeto de esto es comparar si los resultados son similares para según esto tomar medidas solo en el lado de baja tensión. Como esto sucede, todas las medidas se hacen desde el lado de baja tensión. Es interesante conocer que las pérdidas del circuito externo al modelo son despreciables en comparación con las pérdidas que se quieren medir.

La potencia de pérdidas correspondiente a corona se de

das; en cambio, si éstas se expresan en kW/km, eventualmente se podrán comparar con los resultados de una línea real.

En ambos casos se puede ver que las pérdidas son inversamente proporcionales al radio del electrodo central y que las pérdidas son mayores cuando la densidad relativa del aire

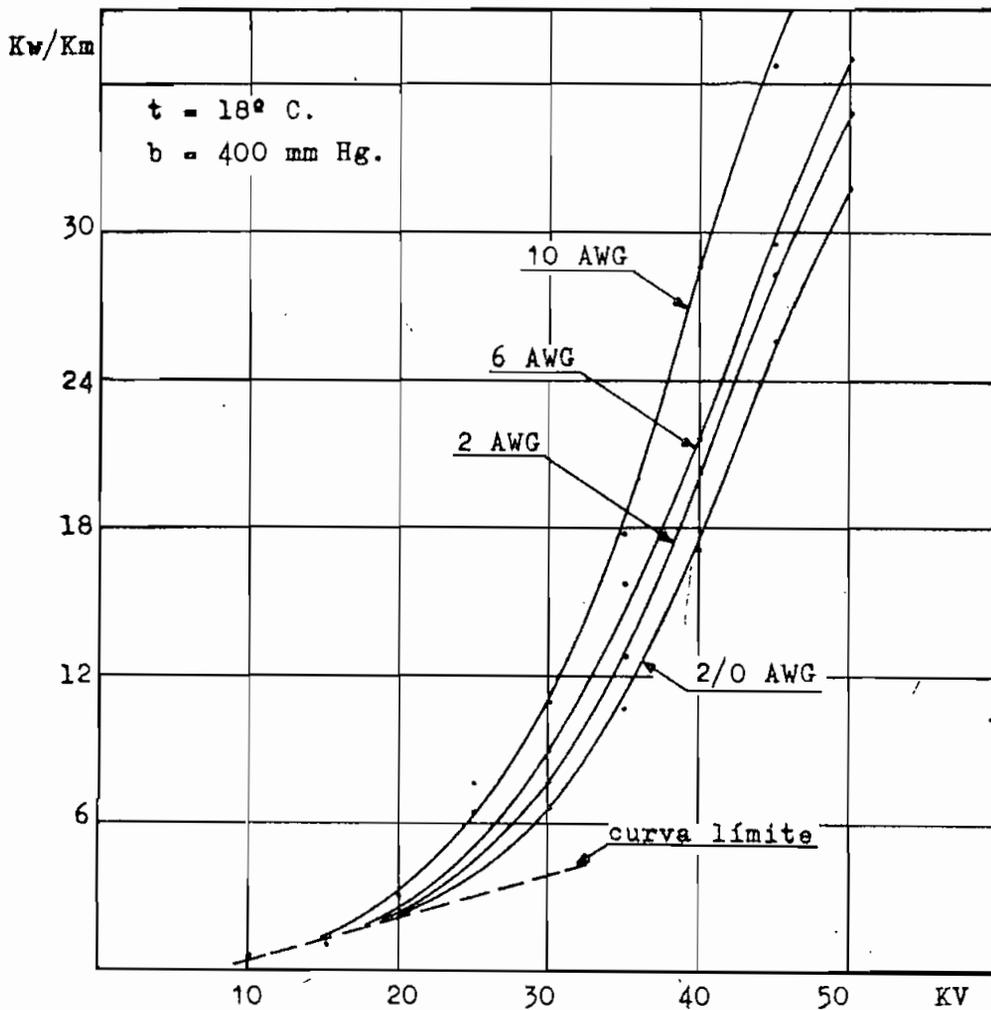


Fig. 2.4 Influencia del electrodo central en las pérdidas de potencia.

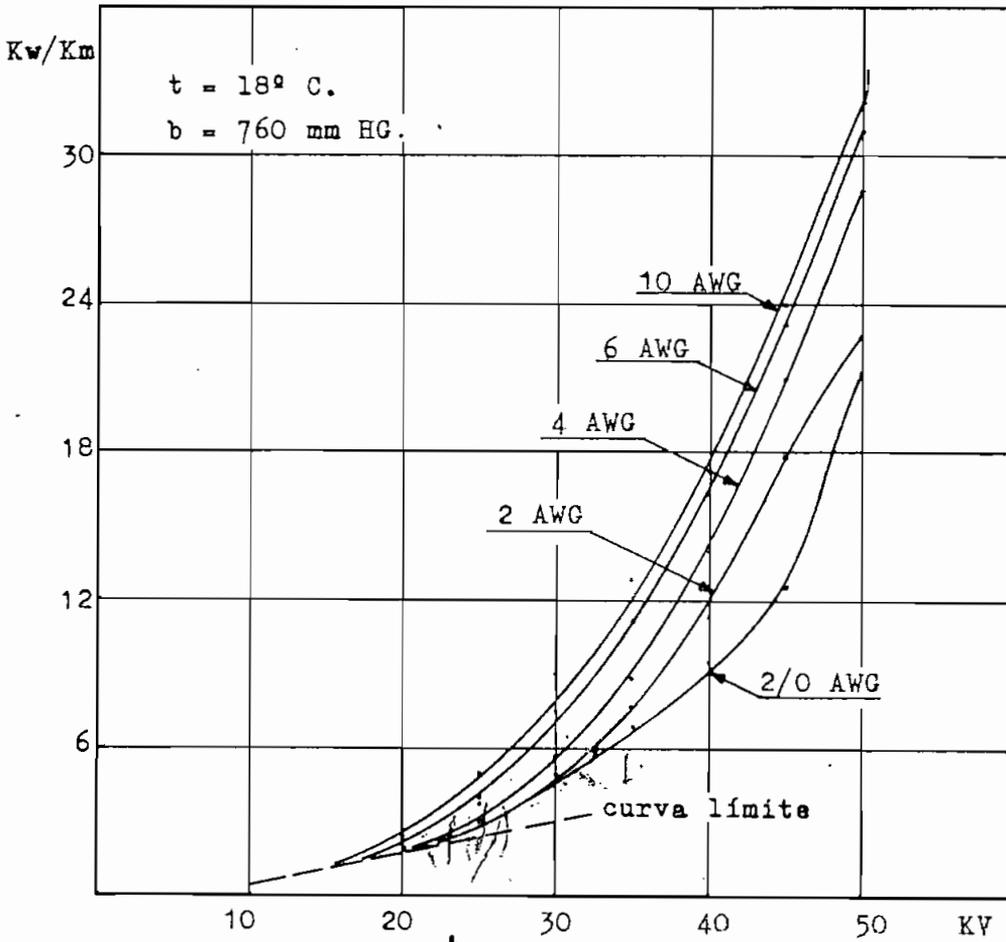


Fig. 2.5 Influencia del electrodo central en las pérdidas de potencia.

es menor.

Las curvas muestran que con bajos voltajes la potencia que se disipa en el circuito es muy baja y que prácticamente no hay pérdidas por corona; pero desde un cierto punto el aumento de pérdidas es mayor; al pasar a la zona de pérdidas mayores se forma un codo en la curva de pérdidas, el mismo que correspon-

de al voltaje de iniciación de la corona de transición, o sea cuando aparece un ruido como de fritura. Si partiendo del gráfico se quiere determinar el voltaje crítico, hay que recordar

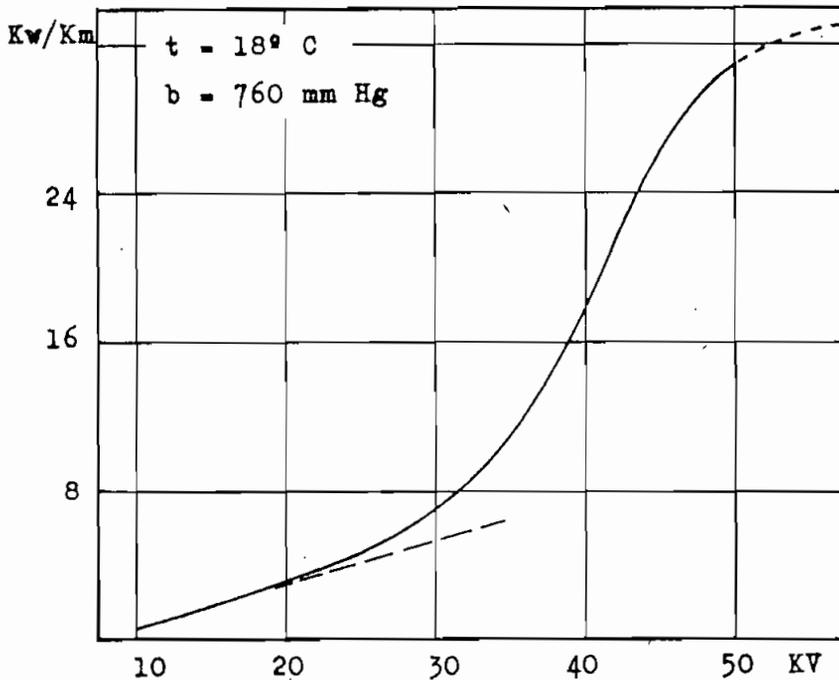


Fig. 2.6 Curva típica de pérdidas obtenida con un conductor sólido No. 4 AWG.

que la corona de transición se produce cuando el voltaje es del 50 al 60% del voltaje crítico.

Es importante observar que cuando el voltaje baja del valor crítico, codo, las curvas tienen la tendencia a unirse dando una curva límite señalada a trazos, la cual fija el mínimo valor de pérdidas bajo el cual no es posible ir para un voltaje dado.

①

Examinando la curva típica de pérdidas, Fig. 2.6, se puede ver que con un voltaje superior al crítico, la curva tiene la tendencia de formar otro codo, notándose cierta semejanza con una curva B-H de un material magnético.

En la Fig. 2.4, se ve que todas las curvas de pérdidas tienen la tendencia a formar este segundo codo y que el voltaje límite de trabajo, 50 kV, ha cortado a las curvas cuando se empezaba a formar el codo.

En la Fig. 2.7 se han dibujado curvas de niveles de

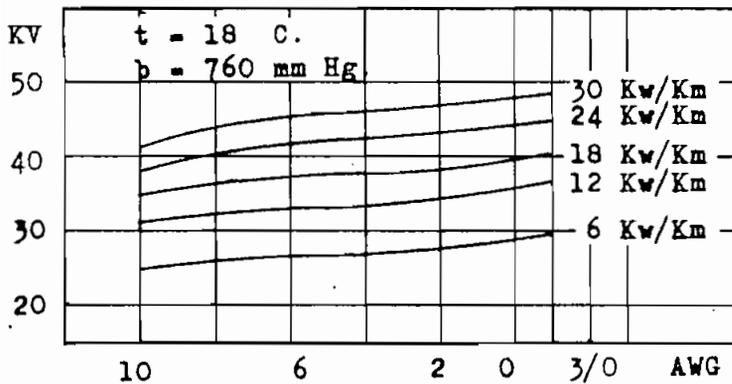


Fig. 2.7 Pérdidas medidas en conductores cableados nuevos.

pérdidas según el tamaño del conductor y la tensión aplicada.

Se puede sacar la conclusión de que si se desea un voltaje de operación mayor, el diámetro de los conductores debe

incrementarse proporcionalmente con el voltaje, aunque las pérdidas por corona tienen la tendencia a aumentar más rápidamente que el voltaje.

Además se puede ver que el incremento de las pérdidas con la tensión es mayor cuando más pequeño es el diámetro de los conductores.

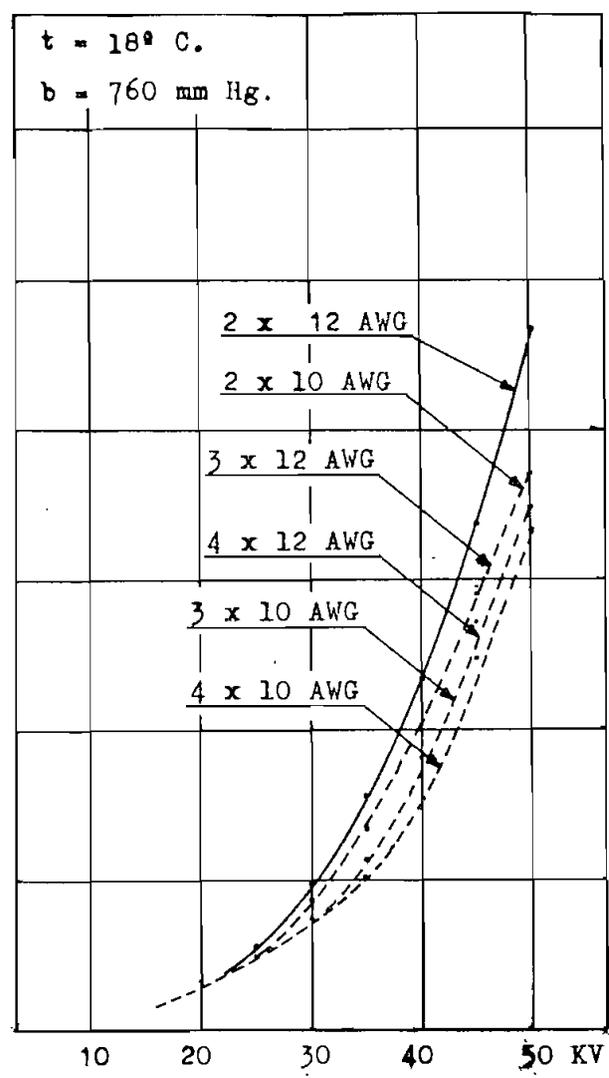
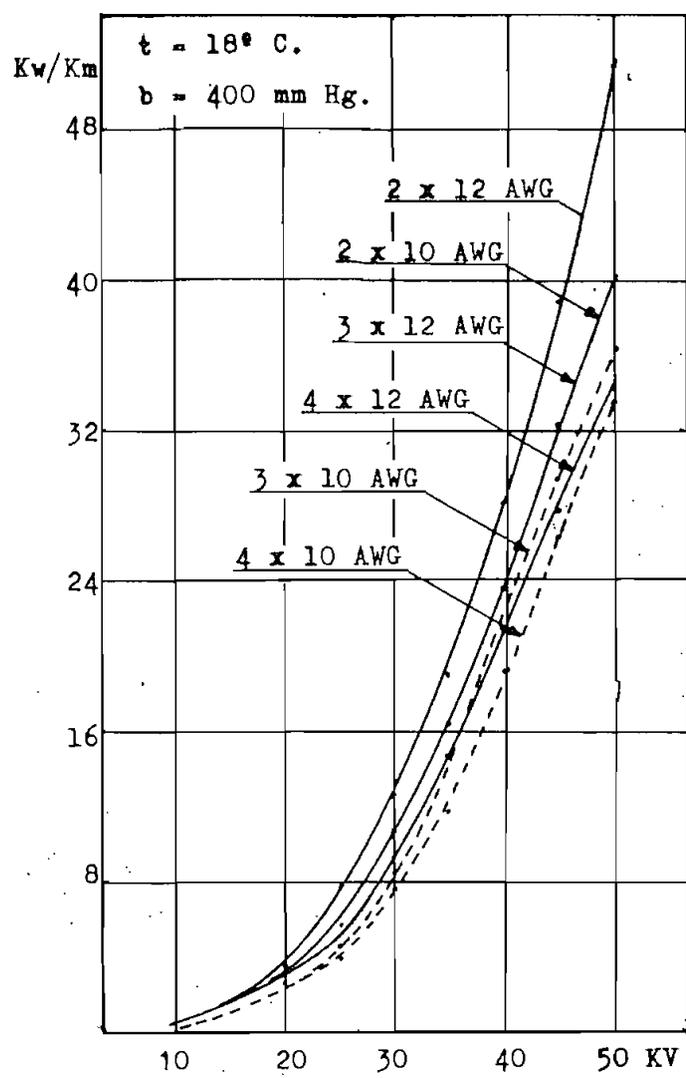


Fig. 2.8 Pérdidas medidas en haces formados con conductores sólidos nuevos.

En las pruebas efectuadas con haces de conductores se ve que hay una apreciable reducción de pérdidas al utilizar un haz de tres subconductores en vez de un haz de dos subconductores. La ventaja de utilizar un haz de cuatro subconductores no es muy marcada, aunque si disminuyen un poco las pérdidas con respecto al de tres subconductores.

Es notoria la influencia del tamaño de los subconductores del haz, mientras mayor es el diámetro de éstos, menores son las pérdidas producidas.

La disminución de pérdidas no es lineal con el aumento del diámetro de los conductores; la influencia del diámetro es continuamente menor y cuando el diámetro pasa de 30 mm apenas es perceptible la mejora con respecto al efecto corona.

Comparando las pérdidas en los haces con las pérdidas producidas en los conductores sólidos se ve que los haces no se comportan exactamente como el conductor sólido de área equivalente, sino que dan pérdidas mayores que éste; esto se debe a que no es igual el comportamiento de los conductores únicos y de los haces.

Con conductores de igual sección equivalente, la capacitancia es diferente, siendo mayor en el haz; la distribución de campo es completamente diferente en los dos casos, siendo la divergencia mucho menor, lo que favorece la aparición de las ramificaciones en el haz. Todos estos factores influyen para

que las pérdidas en los haces sean mayores que las pérdidas en los conductores equivalentes.

De lo anterior se desprende que según el número de subconductores del haz, las pérdidas por corona producidas en los haces corresponden a un conductor sólido del 44 al 69% del área equivalente, siendo el porcentaje más alto el del haz de tres subconductores; el más bajo, el del haz de dos subconductores y al de cuatro subconductores corresponde un valor intermedio de 54%.

Analizando todos los resultados ya indicados se comprueba que del tamaño de los electrodos dependen las pérdidas por corona; el factor obtenido en el laboratorio es:

$$1,061 \log \sqrt{s/r}$$

①

2.3.2 Influencia de la densidad relativa del aire.

Para investigar la influencia del factor densidad relativa del aire sobre las pérdidas por corona, se hacen pruebas con diferentes presiones barométricas; nótese que debido al diseño mismo del modelo no es posible alterar la temperatura ambiental, de manera que todas las pruebas son hechas a esta temperatura y simulando alturas desde el nivel del mar, 760 mm Hg, hasta los 5040 metros sobre el nivel del mar con 400 mm Hg

Los resultados obtenidos se indican en la Fig. 2.9, se

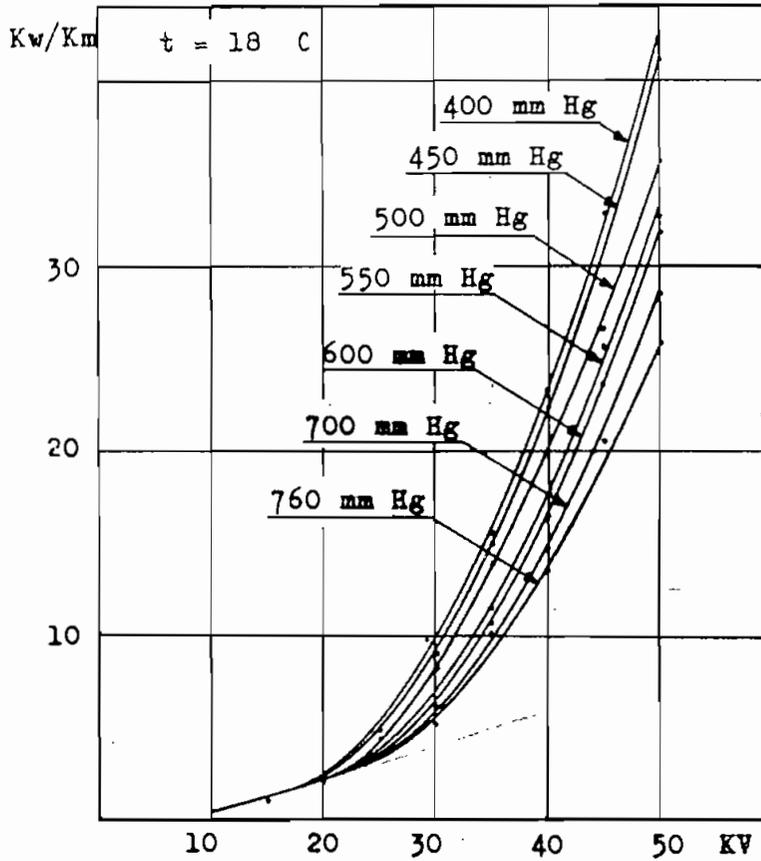


Fig. 2.9 Influencia de la presión barométrica en las pérdidas por corona.

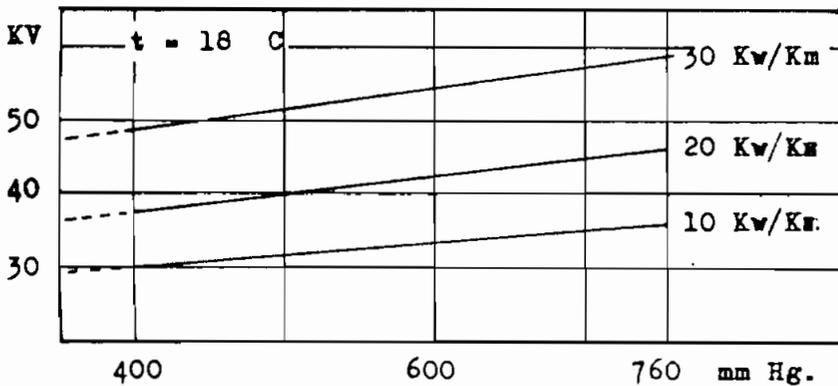


Fig. 2.10 Pérdidas medidas en un conductor cableado No. 6 AWG.

puede ver que se mantiene la forma característica de las curvas de pérdidas, y que éstas son mayores cuanto menor es la presión barométrica.

Analizando los resultados se llega a la conclusión de que las pérdidas por corona son proporcionales a:

$$1,091 / \rho$$

En este estudio se ha tenido mucho cuidado en analizar si la proporcionalidad se mantiena con ρ en el rango de variación de presión, 400 - 760 mm Hg, o si más bien las pérdidas son proporcionales a k .

Después de las respectivas comprobaciones se deduce que las pérdidas son proporcionales a $1,091/\rho$ para presiones de hasta 700 mm Hg y que desde este valor hasta 400 mm Hg, las p \acute{e} r

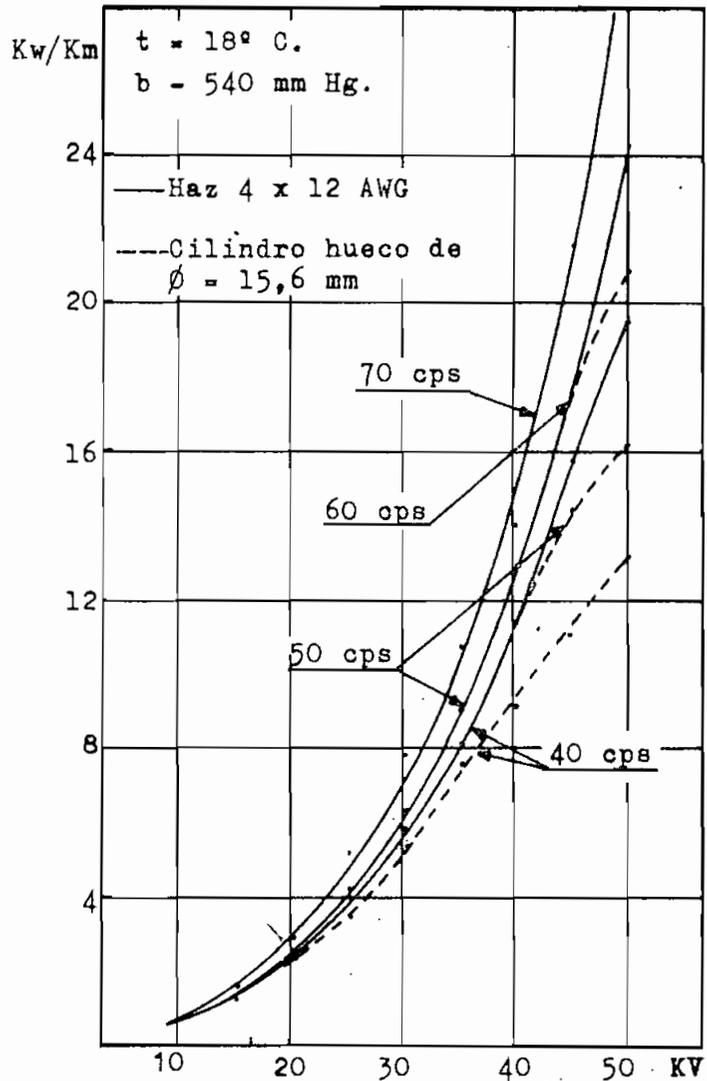


Fig. 2.11 Influencia de la frecuencia en las pérdidas por corona.

①

didadas son proporcionales a $1,091/k$.

2.3.3 Influencia de la frecuencia.

En las pruebas con frecuencia variable se han utilizado dos tipos de conductores, el uno un haz de cuatro subconductores No. 12 AWG y el otro, un cilindro hueco de 15,6 mm de diámetro.

Los resultados, Fig. 2.11, demuestran que las pérdidas aumentan con la frecuencia y se comprueba que las pérdidas son proporcionales al factor:

$$f + 25$$

dentro del rango de frecuencia utilizado, 40 - 70 cps.

Se puede ver nuevamente que un haz da pérdidas mayores que el conductor cilíndrico equivalente.

2.3.4 Influencia del estado de la superficie de los conductores.

En los resultados de las pruebas realizadas para analizar la influencia del estado de la superficie de los conductores, Fig. 2.12, se puede ver que las pérdidas son menores cuando los conductores se aproximan más a cilindros y que las pérdidas son mayores cuando más áspera es la superficie de los conductores.

Comparando conductores cableados de siete hilos y sólidos, ambos nuevos, se ve que las pérdidas siempre son mayores en los conductores cableados. En éstos las pérdidas son mayo

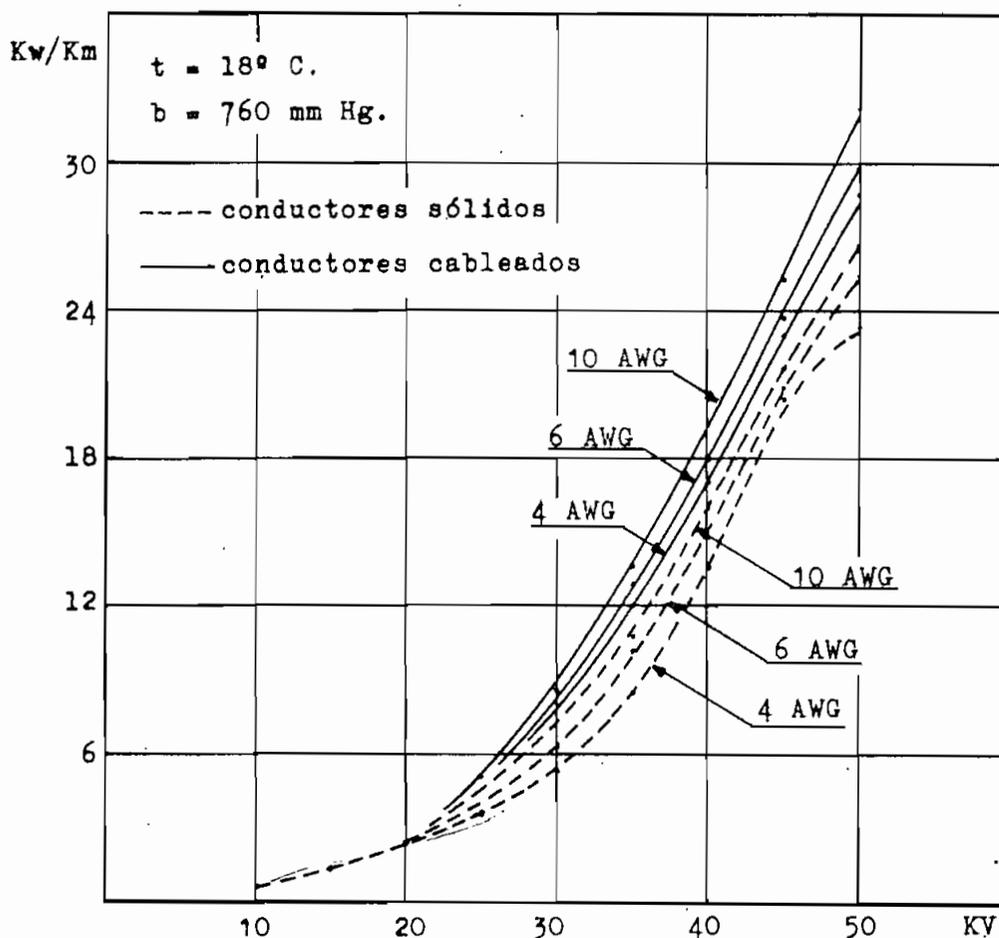
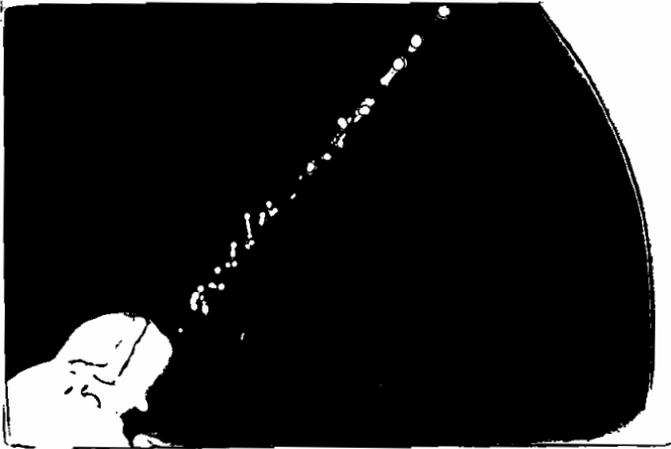


Fig. 2.12 Comparación entre las pérdidas producidas en conductores sólidos y en conductores cableados, ambos nuevos.

res en un 20%, que se mantiene casi constante en todos los casos.

Otra comparación que se hace es entre conductores nue-

vos y viejos, se ve que un conductor completamente nuevo produce un 10% - 12% más de pérdidas que un conductor viejo, denominándose "conductor viejo" a aquel que ha experimentado la natural oxidación del metal y recubrimiento con una fina película negruzca producida por el polvo, grasa y partículas orgánicas que a veces incluso rellenan las desigualdades del conductor



45 kV.

60 kV.

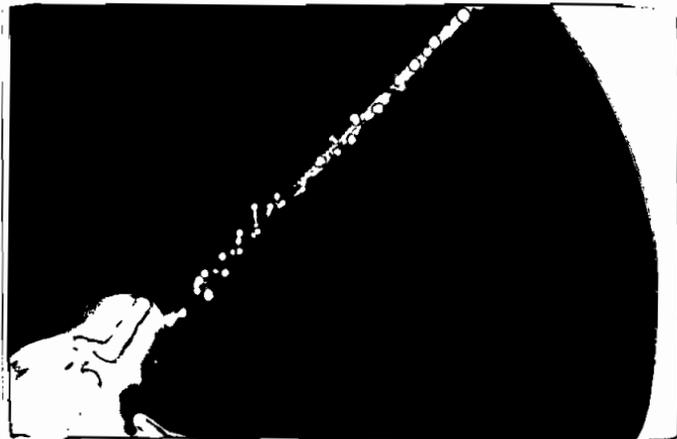


Fig. 2.13 Aspecto físico de un conductor No. 6 AWG con asperezas artificiales.

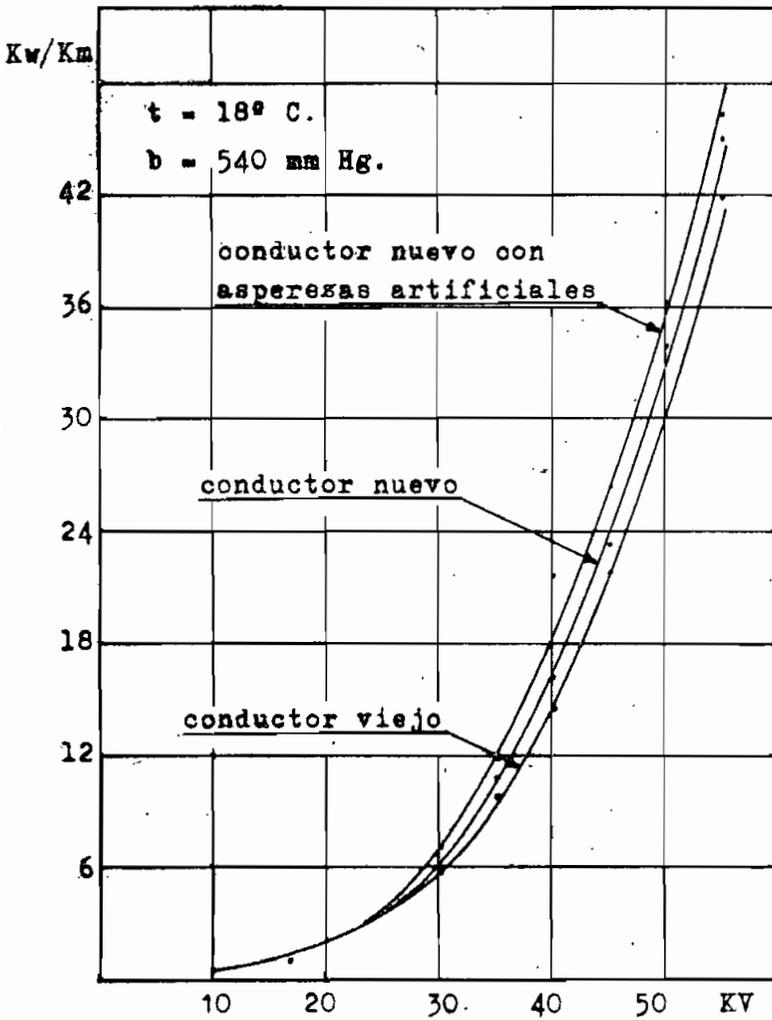


Fig. 2.14 Pérdidas medidas en conductores con diferente estado superficial.

para que éste presente una superficie más uniforme.

Conductores que han estado en servicio mucho tiempo, producen pérdidas mayores debido a que el polvo, grasa y sustancias orgánicas depositadas a través de los años, presentan prominencias irregularmente distribuidas a lo largo del conductor, donde la intensidad de campo adquiere un valor

mayor que propicia a la formación de corona.

Para simular este efecto, aunque exageradamente, en el conductor cableado de la prueba anterior, se ponen puntos de suelda en forma de conos, esta alteración del conductor hace que las pérdidas aumenten en un 10% con respecto al conductor

$$P = 1,1575 k \frac{f + 25}{\partial} \log \sqrt{\frac{S}{r}} V^{2,62} \quad (2,1)$$

Para evaluar la constante se deben hacer muchas comprobaciones con todos los resultados obtenidos hasta aquí. Utilizando los resultados mostrados en la Fig. 2.5, se deduce que:

$$P = 15,40 \frac{f + 25}{\partial} \log \sqrt{\frac{S}{r}} V^{2,62} \times 10^{-6} \quad (2.2) \quad (1)$$

2.3.7 Forma de la onda de corriente según el voltaje aplicado.

Otra manifestación de la corona es la distorsión de la curva de corriente, deformación que se acentúa con el aumento del voltaje. Esto se puede ver en la Fig. 2.16, donde se muestra la deformación de la onda de corriente con relación al aumento de voltaje.

La deformación que da como resultado una onda similar a la de magnetización de un transformador, es debida a la inductancia presente en el circuito de prueba. En cambio, el aumento de tamaño del pico donde se producen las descargas de corona se deben al aumento de capacitancia del modelo conforme aumenta el voltaje. (2)

Esto se explica sabiendo que el proceso de ionización empieza inmediatamente antes de la perforación, lo que produce

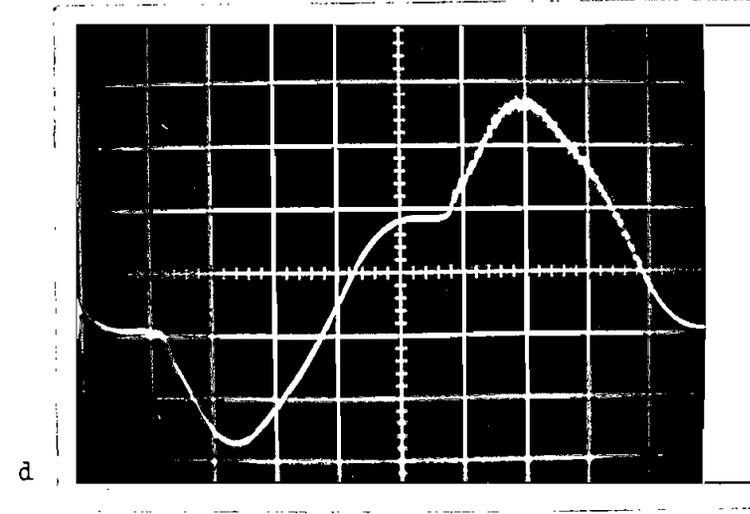
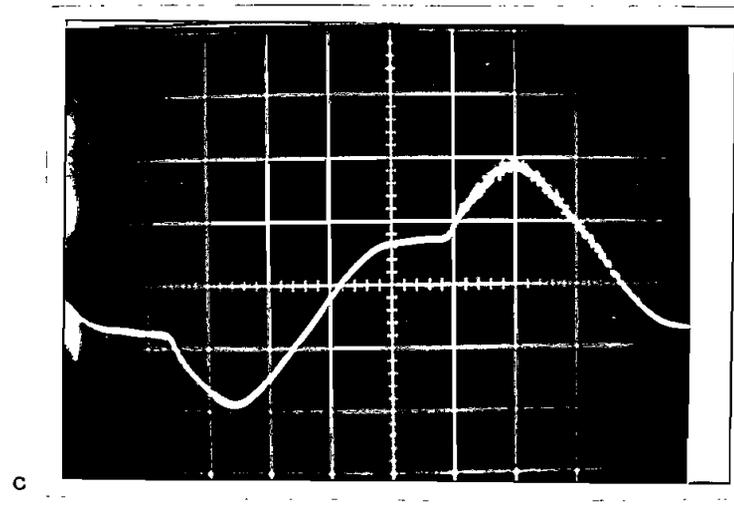
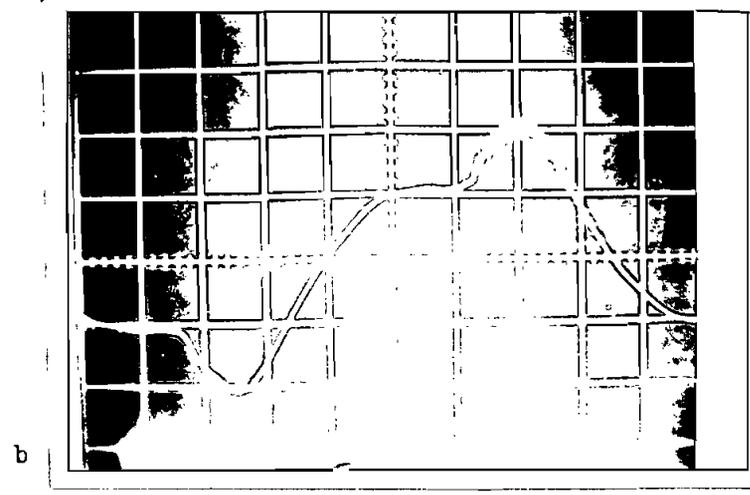
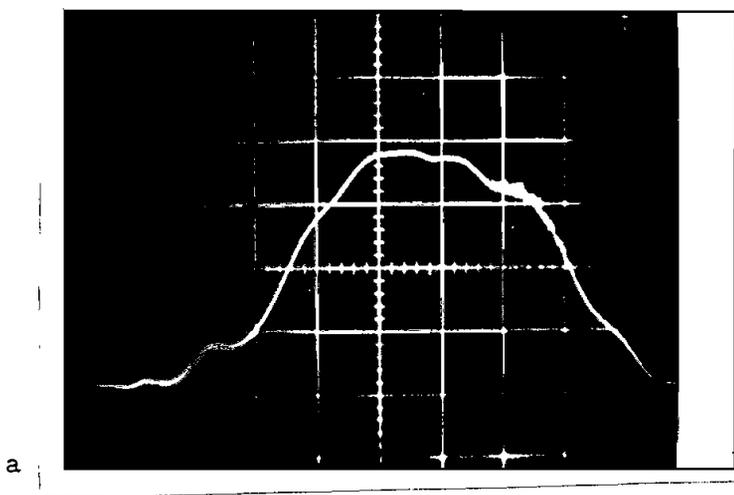


Fig. 2.16 Distorsión de la curva de corriente con el incremento del voltaje
 a) 20 kV, Esc.vert: 2 vol/div, b) 30 kV, Esc.vert: 5 vol/div.
 c) 40 kV, Esx.vert: 10 vol/div, d) 50 kV, Esx.vert: 20 vol/div.
 En todos los casos, Escala horizontal: 2 mseg/div.

que las pérdidas aumenten muy rápidamente con el incremento del voltaje; cuando la ionización ha llegado hasta un cierto estado, aparecen penachos luminosos y al mismo tiempo cargas espaciales que aumentan la capacitancia del conductor.

La forma de la onda encontrada experimentalmente en el laboratorio, Fig. 2.17, concuerda con la obtenida por Holm

Bibliografía

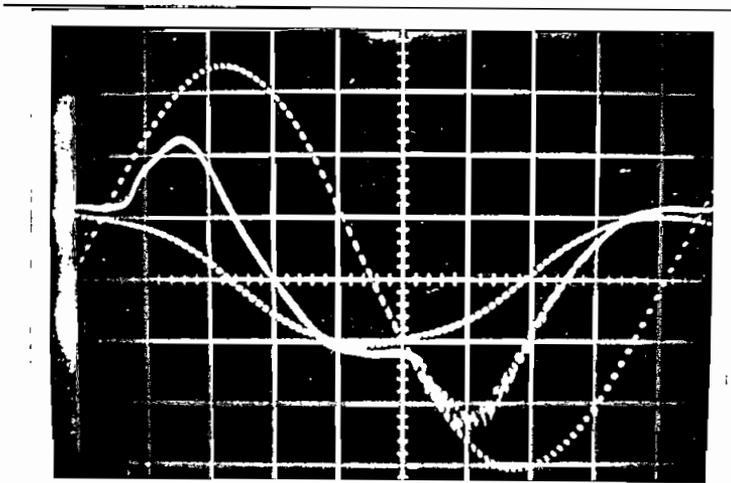


Fig. 2.17 Ondas de corriente de corona, de su componente fundamental de 60 cps y del voltaje aplicado. Tensión de prueba: 32 kV. Escalas: vertical 2 volt/div, horizontal 2mseg/div.

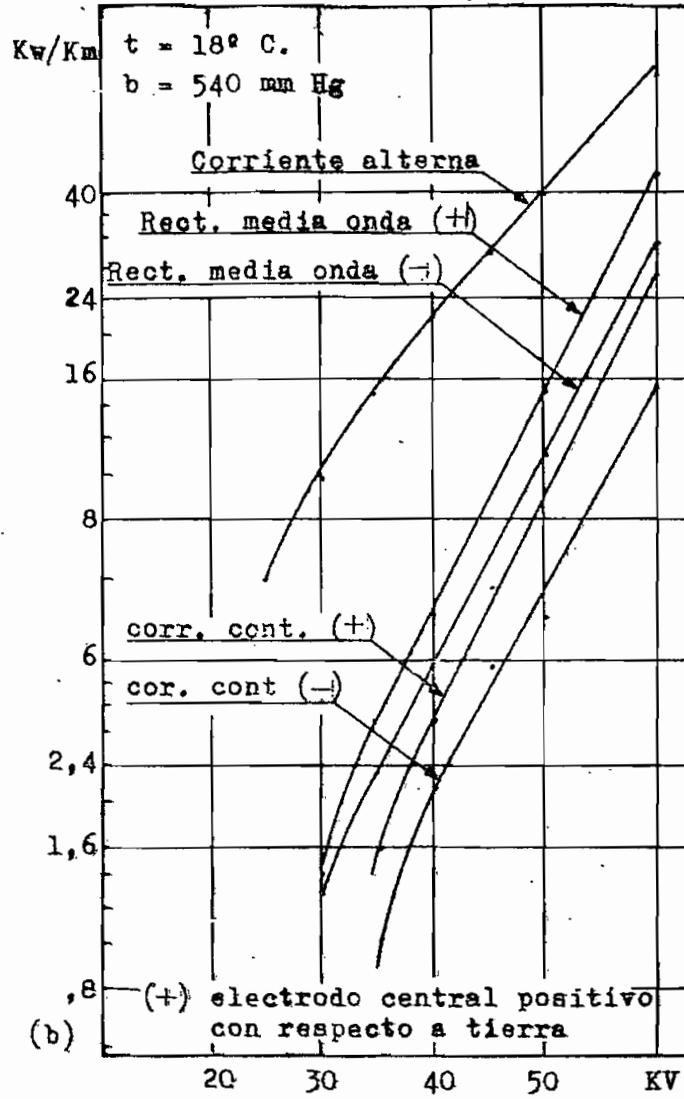
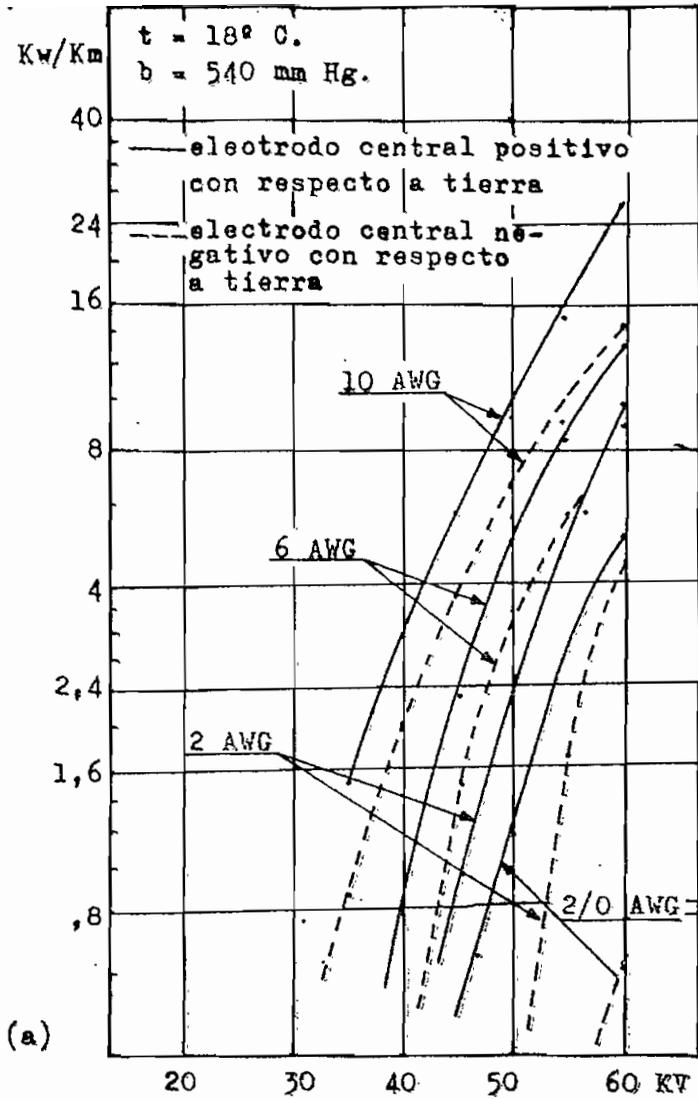
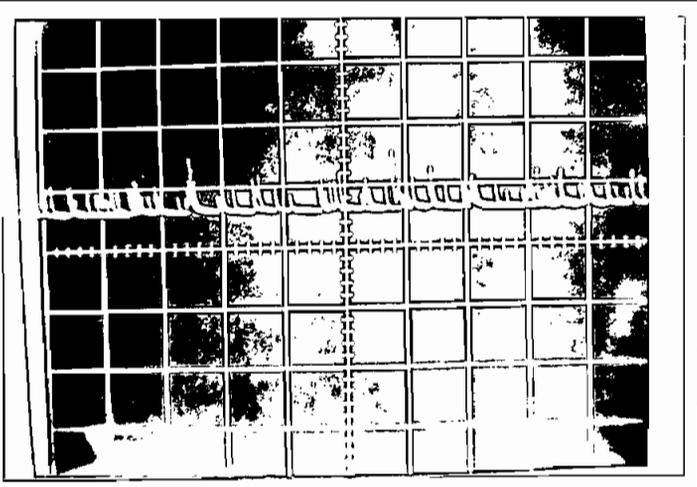


Fig. 2.19 Pruebas con corriente continua: a) con diferentes tamaños de conductores, y b) Comparación de las pérdidas producidas en un conductor cableado No. 10 con diferentes formas de corriente.



30 kV

Escalas:

vertical: 1 volt/div.

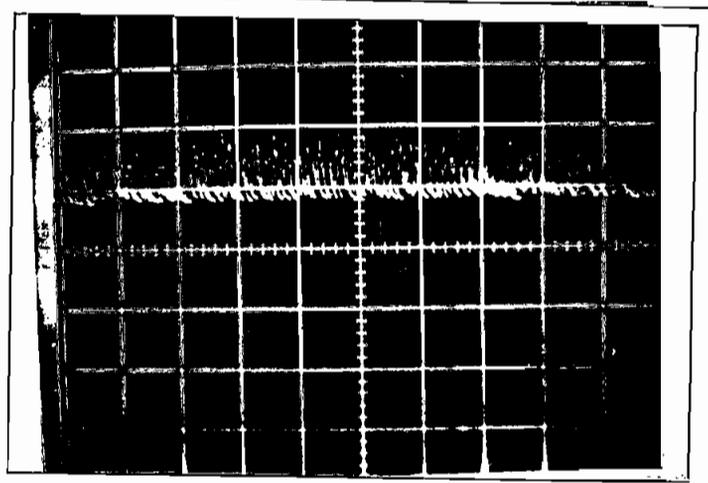
horizont: .5mseg/div.

35 kV

Escalas:

vertical: 1 volt/div.

horizont: .5mseg/div.



40 kV.

Escalas:

vertical: 1 volt/div.

horizont: .5mseg/div.

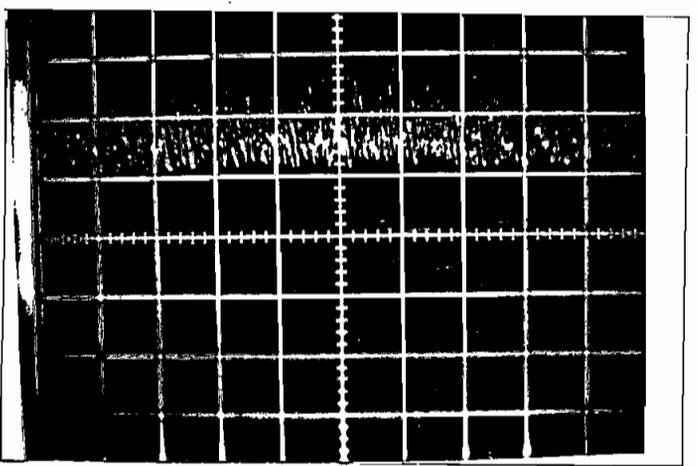


Fig. 2.20 Variación de la curva de corriente con el incremento del voltaje aplicado, positivo con respecto a tierra.

más se han dibujado las pérdidas producidas en el mismo conductor con las dos polaridades de corriente continua y con corriente alterna.

Se puede ver que las pérdidas producidas en el semiciclo positivo son mayores que las producidas en el semiciclo negativo, resultados similar al obtenido con corriente continua.

Además se puede ver que las pérdidas producidas con corriente alterna son mayores que las producidas con corriente pulsante y con corriente continua. Aproximadamente, las pérdidas con corriente alterna son el 250% de las pérdidas con corriente continua positiva y 400% de las pérdidas con corriente continua negativa.

2.4 Magnitud de las descargas.

En la Fig. 2.22 se indica un oscilograma de una descarga Rudolph, este tipo de descarga se identifica por el voltaje al que se produce, 7 kV, que corresponde al 37% del voltaje crítico del conductor No. 10 AWG, valor que cae dentro del campo de las descargas Rudolph.

Utilizando la ecuación 1.2 se calcula la carga de esta descarga.

La constante de tiempo se define como el tiempo necesario para que una onda se amortigüe hasta el 35%, según esta definición la constante de tiempo de la onda del oscilograma es

600 nseg.

En la tabla T2.1 se ve que la capacitancia del modelo es 29,24 μuF , cuando el electrodo central es un conductor No. 10 AWG, que equivalen a 11,699 $\mu\text{uF}/\text{m}$. Reemplazando valores se tiene que:

$$\begin{aligned} Q &= 20 \text{ v e}^{-\tau} \\ &= 2 \times 11,69 \times 2 \times 6 \times 10^{-11} \\ &= 28,8 \times 10^{-12} \text{ coulombios} \\ &= 3 \times 10^{-11} \text{ coulombios} \end{aligned}$$

①

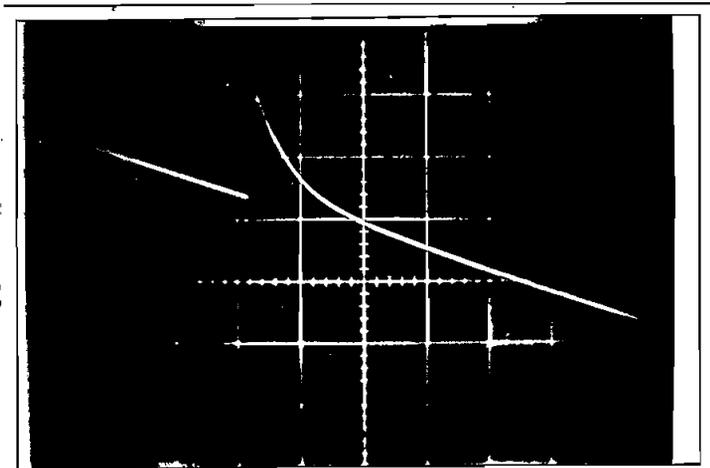


Fig. 2.22 Oscilograma de una descarga Rudolph producida a 13 kV en un conductor cableado No. 10 AWG. Escalas: vertical: .01 volt/div. horizontal: 10 useg.

2.5 Análisis espectral de la onda de corriente.

Este punto tiene por objeto determinar la magnitud de las diferentes componentes armónicas de la onda de corona.

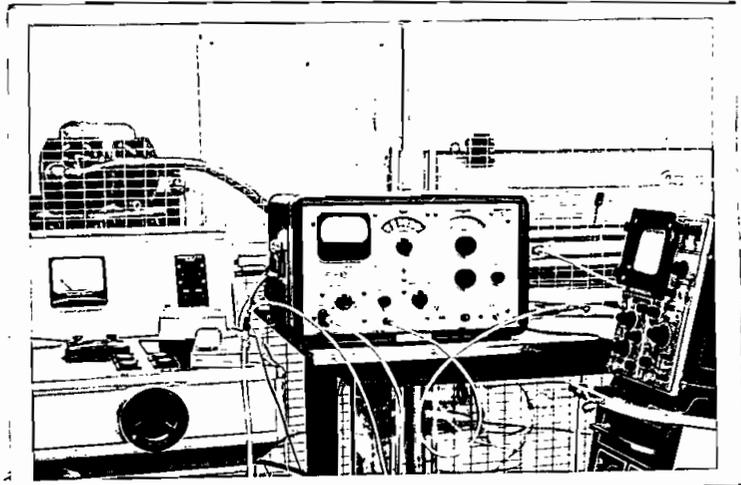


Fig. 2.23 Disposición de los equipos utilizados en el análisis espectral de la onda.

El circuito es similar al utilizado en las pruebas con corriente alterna. La señal obtenida en la resistencia intercalada en serie en la conexión de tierra es llevada al analizador de onda, que básicamente es un voltímetro de válvula con filtros pasabanda, donde fácilmente se pueden separar las armónicas.

El análisis se hace en pasos pequeños de frecuencia, desde 0 cps hasta 50 kcps que es el máximo valor que tiene el analizador de onda.

El espectro encontrado, Fig. 2.25, muestra que la magnitud de las armónicas decrece con la frecuencia. Se nota claramente la influencia de las armónicas impares presentes, terce

ra, quinta, séptima, novena, undécima, las mismas que distorcionan a la onda sinusoidal.

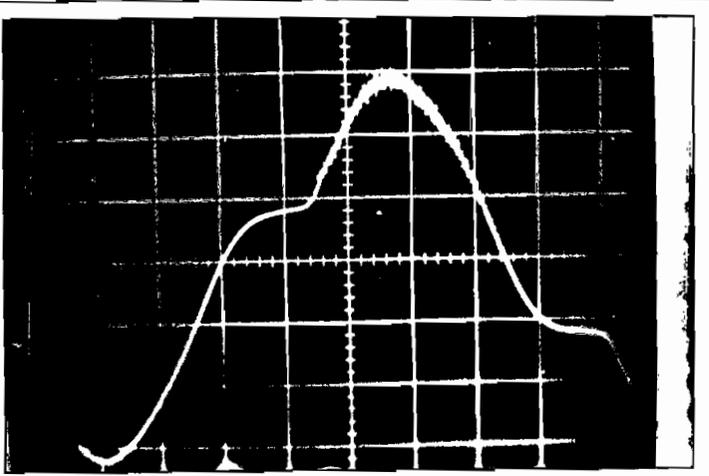
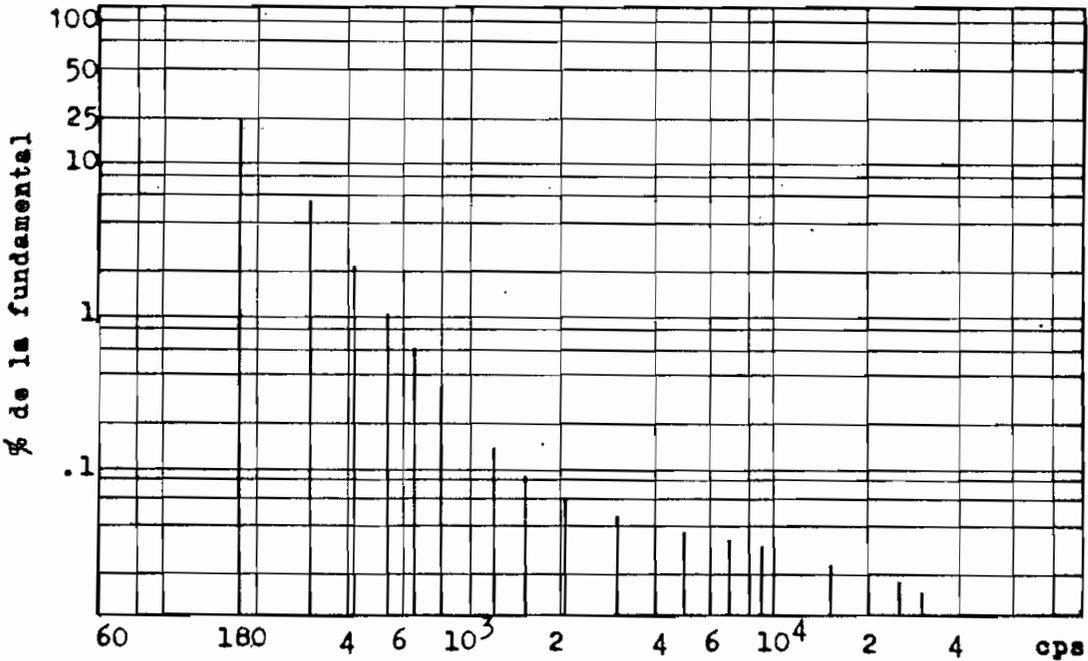


Fig. 2.24 Oscilograma de la onda de corriente de corona producida a 45 kV en un conductor No. 10 AWG.

Escalas:
Vertical: 10 volt/div.
Horizontal: 2 mseg/div.



1

Fig. 2.25 Espectro discreto de la onda de corriente de la Fig. 2.24.

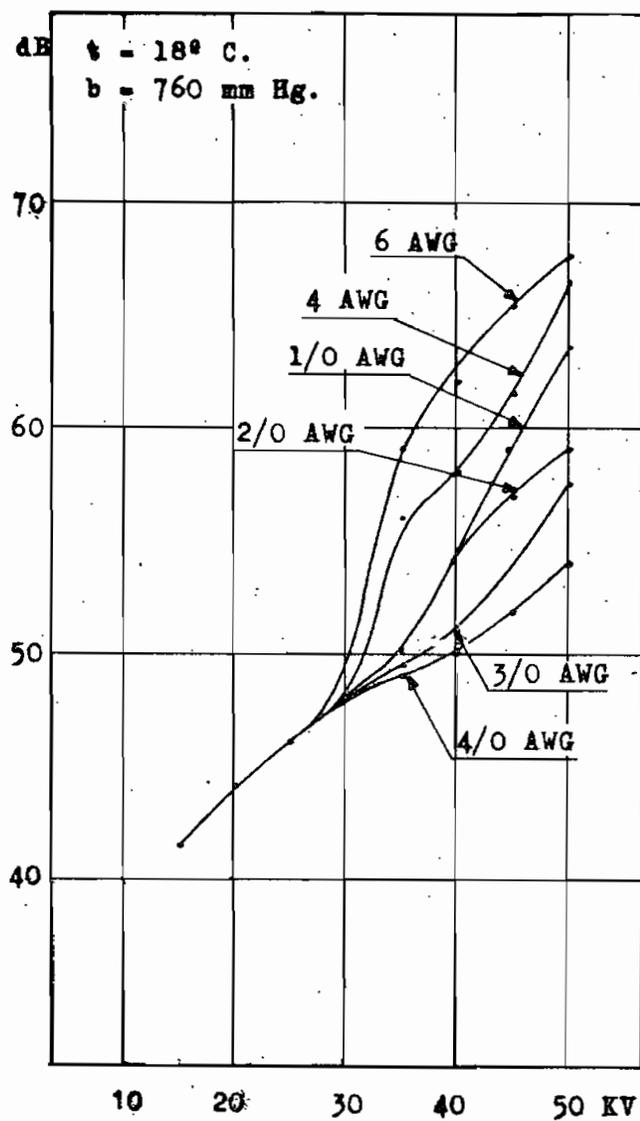
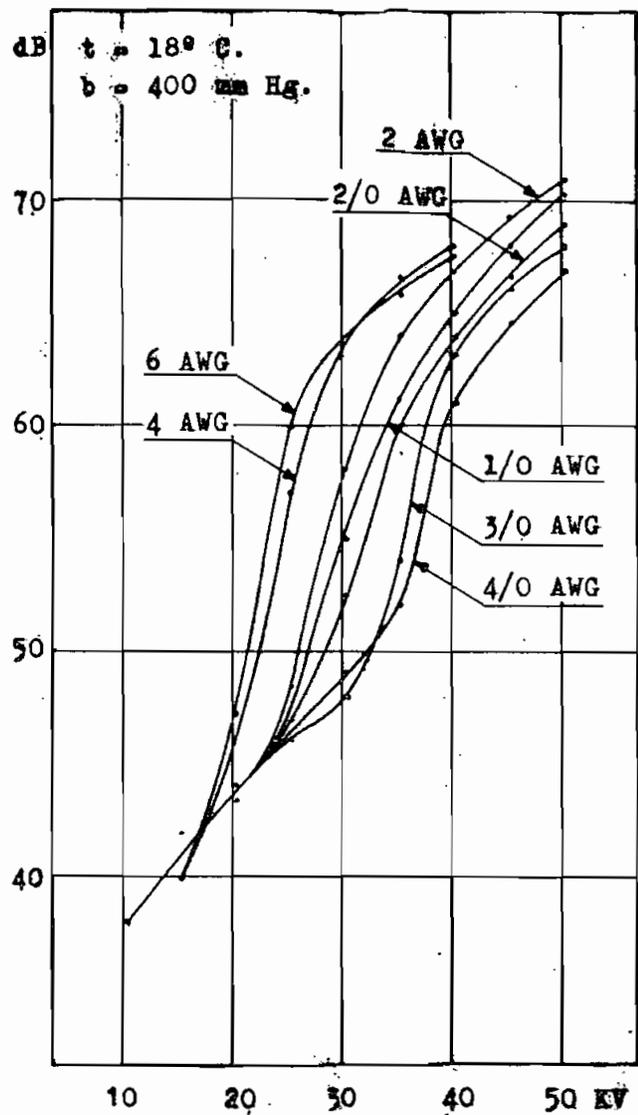


Fig. 2.26 Medida del nivel de ruido en diferentes tamaños de conductores.

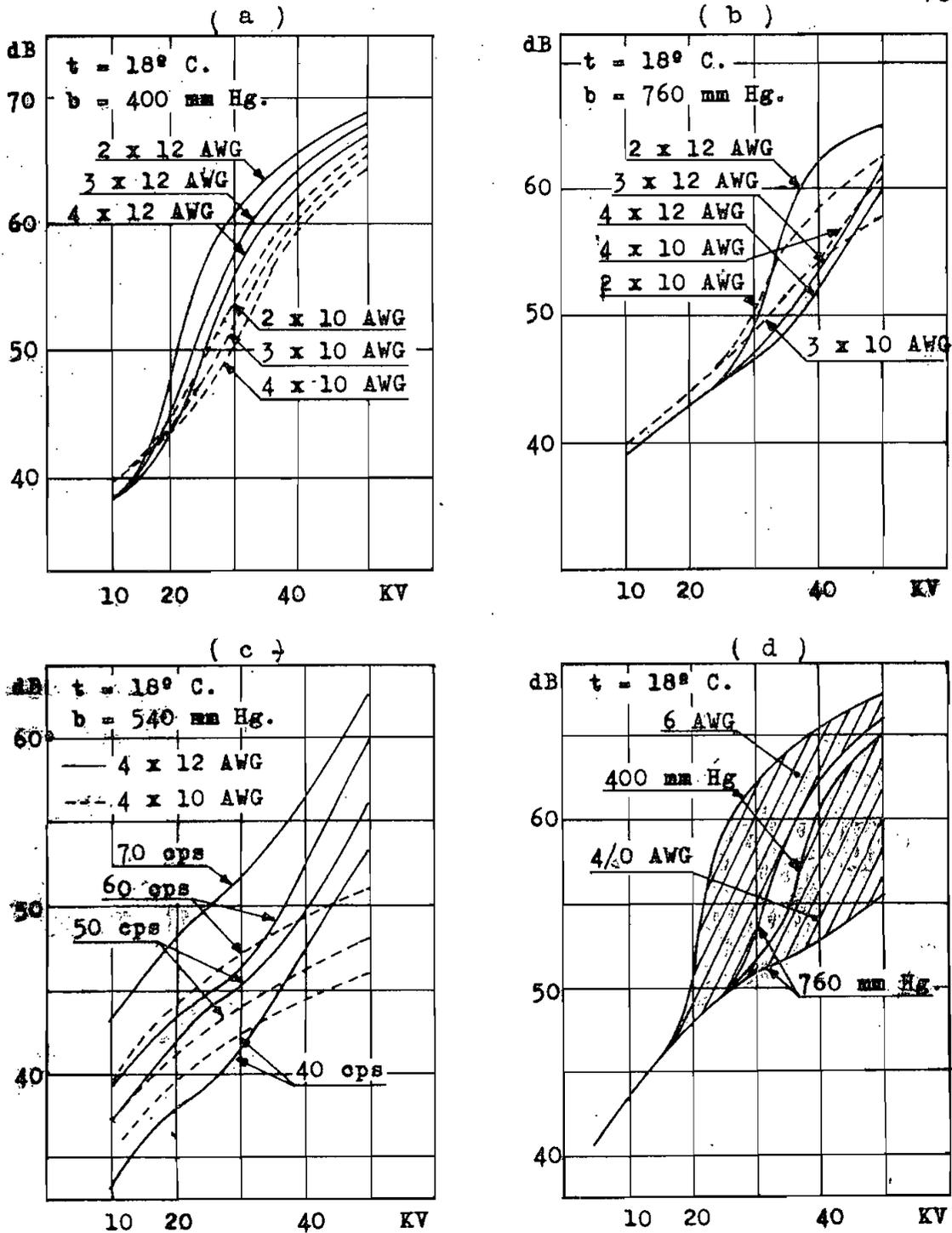


Fig. 2.27 Medidas del nivel de ruido: a) y b) con haces de conductores, c) con distintas frecuencias, d) zona de ruido de dos conductores diferentes.

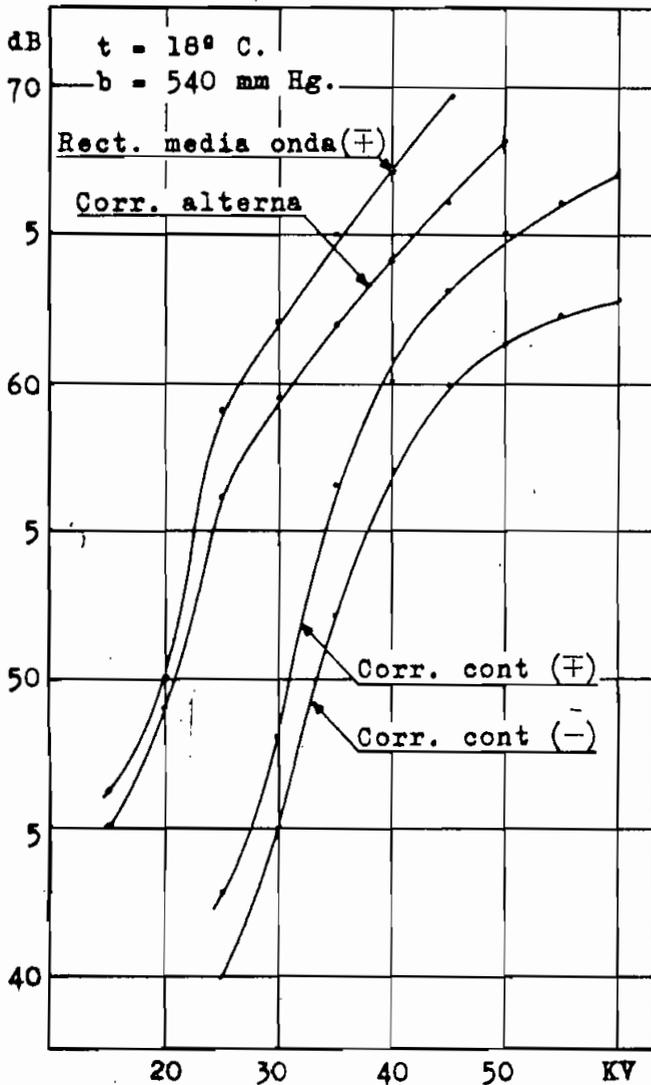


Fig. 2.28 Ruido producido en un conductor No. 10 AWG

También se puede ver que el máximo ruido producido por el conductor de diámetro mayor, es menor que el mínimo nivel de ruido producido por el conductor de diámetro menor.

Comparando el ruido audible producido con diferentes tipos de corrientes, con corriente alterna, el nivel de ruido

ción de la frecuencia, ahora se ve que es mayor el ruido audible producido cuanto más alta es la frecuencia; y que en los conductores de diámetro mayor, la intensidad de la corona es menor.

En la Fig. 2.27d se puede ver la zona de ruido de dos conductores diferentes, uno muy grueso y otro muy delgado; los límites máximos corresponden a la menor presión 400 mm Hg y los mínimos a la presión mayor 760 mm Hg, ambos medidos a la misma temperatura de 18° C.

es mayor que con corriente continua; y de la corriente alterna el semiciclo positivo es el que produce más ruido; similarmente, con corriente continua el electrodo de polaridad positiva produce más ruido que el negativo.

2.7 Utilización del modelo cilíndrico en el estudio de una línea real.

La idea de construir este modelo y hacer en él el estudio de la corona está encaminado a poder representar una línea real.

Los pasos previos para llegar a este punto son conocer al modelo matemática y prácticamente. Una vez cubierta esta primera etapa hay que hacer comparaciones entre una línea de prueba y el modelo; para esto se debe realizar en la línea experimental todas las pruebas aquí descritas; estos resultados se comparan con los obtenidos en el modelo coaxial para estar en capacidad de representar una línea real en este modelo de laboratorio.

Para hacer las comparaciones y las pruebas en la línea experimental se puede partir de la fórmula de Peek para el cálculo de las pérdidas por corona.

$$P = \frac{390}{\delta} (f + 25) \sqrt{\frac{r}{s}} (V - V_0)^2 \times 10^{-5} \quad (2.3)$$

Si las pruebas en los dos modelos se hacen en condicio

C A P I T U L O I I I

C O N C L U S I O N E S

El modelo cilíndrico construido especialmente para este trabajo fue diseñado según las necesidades y disponibilidades del laboratorio de alta tensión. La parte que más dificultades ofreció fue la relacionada con la construcción de las tapas aisladas del modelo y luego el cierre hermético del mismo.

Los bushings fueron contruidos con la idea de que estén exentos de corona y sirvan de soportes para los electrodos de prueba y para la conexión del modelo con el transformador de alta tensión.

Debido a que este tema ha sido muy poco o casi nada tratado fue una tarea larga y difícil conseguir bibliografía adecuada.

Para el cálculo y análisis de los resultados obtenidos en el laboratorio así como para las comprobaciones matemáticas se utilizó un computador digital. Su uso ha sido restringido

por su alto costo.

Investigar un fenómeno en un modelo es algo que recientemente se está introduciendo en nuestro medio; su ventaja radica en permitir simular el fenómeno en estudio para condiciones controladas.

Las conclusiones a las que se llegó en el capítulo II vale la pena mencionar aquí.

El fenómeno de corona se produce en las líneas de transmisión por una distorsión local del campo. La forma e intensidad del fenómeno depende del tipo de corriente y de la polaridad utilizada; además está relacionada con las condiciones físicas del medio ambiente y condiciones geométricas propias de los electrodos.

Un factor muy importante en el diseño de una línea es el diámetro de los conductores que deben ser elegidos según un criterio técnico-económico. Se ha visto que no es conveniente aumentar indefinidamente el diámetro de los conductores para disminuir las pérdidas por corona ni formar haces de muchos subconductores. Es importante conocer el comportamiento comparativo entre haces y conductores sólidos debido a que da un criterio valioso en la selección económica del conductor.

Con un voltaje dado, un incremento en el tamaño del conductor produce la correspondiente reducción de corona, tanto en pérdidas como en ruido audible.

Se ha comprobado que las pérdidas en el modelo son función de la frecuencia, densidad relativa del aire y relación de separación al radio de los conductores, en la misma proporción que en la fórmula de Peek, aunque los dos últimos han sido modificados por coeficientes que en la ecuación encontrada pasan a formar parte de la constante.

En la ecuación para el cálculo de las pérdidas no intervino el voltaje crítico por las razones expuestas en el capítulo II 2.3.6.

Se deben hacer más pruebas y comprobaciones para asegurar la bondad de la ecuación (2.2).

A P E N D I C E A

DISEÑO Y CONSTRUCCION DEL MODELO CILINDRICO PARA PRUEBAS DE EFECTO CORONA

El primer problema que se presenta es tener idea del tamaño que se va a dar al cilindro de prueba, para lo cual hay que tener en cuenta algunos factores como: voltaje máximo disponible en el laboratorio, voltaje con el que se desea trabajar y espacio físico donde se situará este equipo.

Se hacen pruebas con diferentes tamaños de cilindros para conocer el comportamiento aproximado de cada uno de ellos.

En un modelo coaxial, la distancia crítica d_0 con la que empieza la corona satisface la ecuación:

$$(d_0 + r)^2 - r^2 = \frac{r k E_0}{f} \quad \text{(A.1)}$$

Para conocer aproximadamente el diámetro mínimo que debe tener el modelo cilíndrico, se calcula la distancia crítica para el conductor más delgado y el más grueso que se cree que

se van a utilizar.

A base de estos datos y de la disponibilidad física del laboratorio de Alta Tensión de la Escuela Politécnica Nacional, se decide la construcción de un cilindro de 60 cm de diámetro por 2,5 m de longitud.

En el modelo se espera tener variaciones de presión entre 400 mm de mercurio y 760 mm de mercurio, o sea para simular alturas hasta de 5040 metros sobre el nivel del mar, de manera que el diseño de la cámara debe cumplir esta condición de presión.

Como este equipo se está diseñando para hacer pruebas sobre efecto corona, en el momento de efectuar los ensayos, el fenómeno de corona debe estar perfectamente controlado, es decir, que la corona debe aparecer sólo en los electrodos de prueba; de este dato se parte para diseñar los bushings del modelo

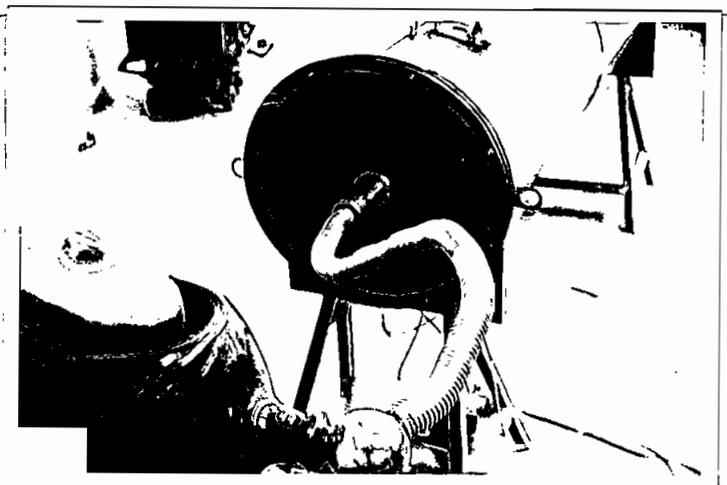


Fig. A.1 Detalle del cable para la conexión del modelo con el transformador de A.T.

y el conductor con que se conecta el modelo con el transformador de alta tensión.

Los electrodos de prueba se sitúan en el sentido del eje del cilindro y se sujetan en las tapas del mismo, razón por la que éstas deben ser de un buen material aislante y además poseer una buena resistencia mecánica que les permita soportar las variaciones de presión que se tienen en el modelo.

En el mercado local no se encontró un material que reúna las dos condiciones anteriores ya que los existentes solo cumplen una de las dos condiciones; sin embargo, a base de lo disponible se debe preparar un material adecuado para este fin.

La madera terciada se consigue fácilmente y si el espesor es adecuado resiste perfectamente las variaciones de presión que se producen en el cilindro; el inconveniente es que la madera aunque sea con un bajo porcentaje de humedad no es un buen aislante y al alcanzar un cierto gradiente de potencial se quema. Por este motivo hay que investigar algunos materiales impermeabilizantes para recubrir a la madera, luego de que ésta haya sido perfectamente secada.

Muestras de madera preparadas con este fin se impregnan con parafina, después de haber sido secadas en horno. Los resultados son satisfactorios cuando a las muestras se les aplica tensión inmediatamente después de la impregnación; pero fallan al aplicarlas la misma tensión después de haber transcurrido

Preparadas algunas muestras de la manera ya indicada y sometidas a las pruebas de tensión, dan resultados satisfactorios; pero aparece una nueva incógnita sobre el tiempo que van a durar estas muestras con tensión aplicada. Para conocer la respuesta se hacen dos pruebas de duración: a una muestra se



Fig. A.3 Muestra de la Fig. A.2 a las 24 horas de iniciada la prueba.

Fig. A.4 Muestra de la Fig. A.2 al finalizar la prueba de duración.



le aplica 100 kV durante 50 horas y a otra, 100 kV durante 72 horas; en ambos casos los resultados son excelentes.

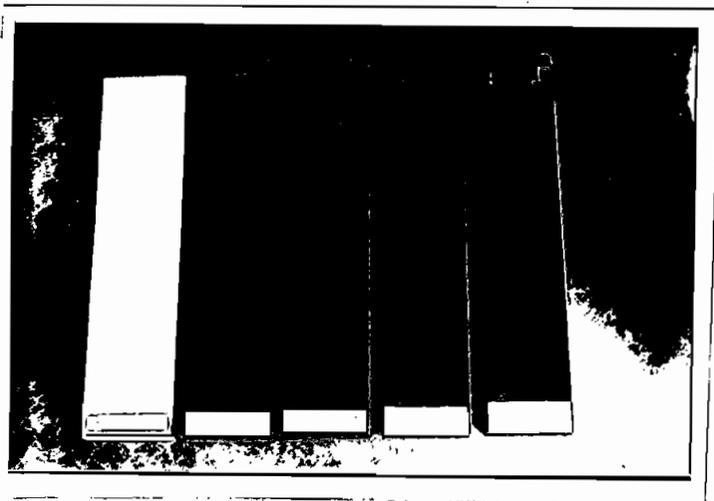


Fig. A.5 Muestras preparadas para las diferentes pruebas, tanto de tensión como de duración.

Durante estas pruebas se toman fotografías nocturnas cada media hora, para estudiar el comportamiento de las muestras, Fig. A.3 y A.4.

Como los resultados son buenos se deciden que las tapas del cilindro sean sometidas al tratamiento antes indicado.

Para cerrar herméticamente el cilindro se colocan empaques entre éste y las tapas de madera.

Para medir la presión en el modelo se instala un manómetro. En la conexión del cilindro a tierra se intercala una resistencia de valor conocido donde se puede conectar un voltímetro, un osciloscopio o un analizador de onda. Con el primero se conoce el módulo; con el segundo, la forma de la onda; y con el tercero, el espectro de frecuencias, los tres de la corriente de corona.

Además el modelo cuenta con una pequeña cámara donde se instala un micrófono, el que se conecta a un medidor de ruido

el que detecta el nivel de ruido audible.

El detalle de este modelo se indica en la Fig. A.6 y la forma de armarlo en la Fig. A.7.

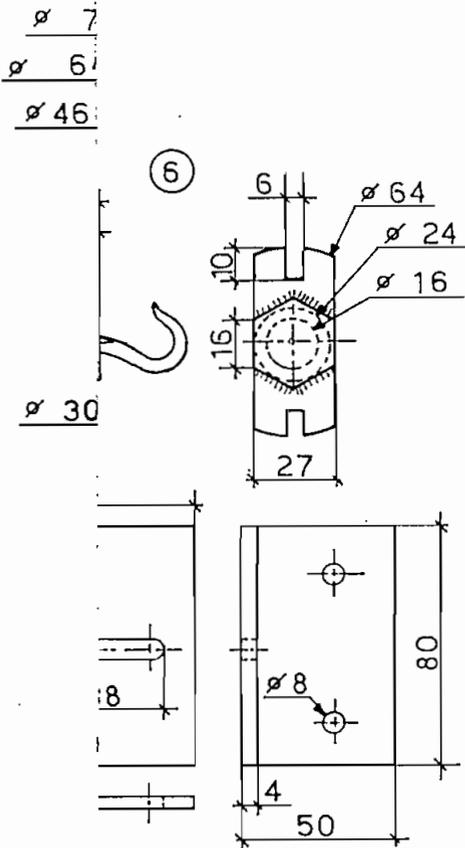
El siguiente paso consiste en construir los electrodos de prueba, para lo cual se calculan las pérdidas que se tendrían si el electrodo central estuviera constituido por conductores únicos desde el No. 14 AWG hasta el No. 4/0 AWG, así como haces con 2, 3 y 4 subconductores en el mismo rango de variación.

Hacer esto personalmente es un trabajo laborioso, en cambio, si se hace con un computador digital es mucho más fácil y rápido; por esto se sigue el segundo camino.

A base de los resultados se escogen los conductores para las pruebas a partir de un valor razonable de pérdidas por corona por unidad de longitud.

LEYENDA

- 1 Tapa de madera impregnada e impermeabilizada
- 2 Brida
- 3 Tapas de los bushings
- 4 Bushing
- 5 Tuercas para sujeción de los bushings en las tapas
- 6 Portaelectrodo
- 7 Portamicrofono
- 8 Conductor libre de corona
- 9, 10, 11 Porta cámara fotográfica



ESCUELA POLITECNICA NACIONAL
 MODELO CILINDRICO PARA PRUEBAS
 SOBRE EFECTO CORONA

DISEÑO: P. ORBE

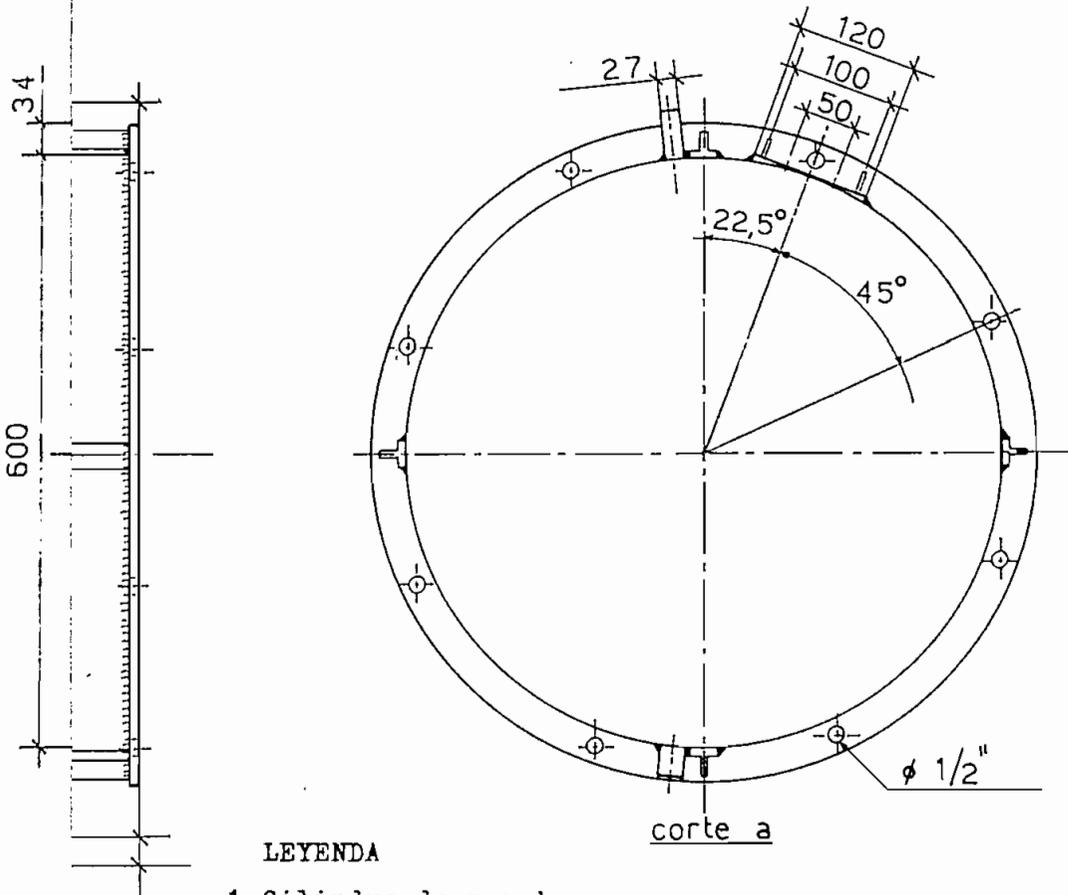
APROBO: Ing. A.MENA

ESCALA: 1:25

DIBUJO: P. ORBE

Noviembre de 1971

Fig. A.6



LEYENDA

- 1 Cilindro de prueba
- 2 Manómetro
- 3 Empaques
- 4 Tapas de madera impregnada e impermeabilizada
- 5 Brida
- 6 Pernos
- 7 Bushing
- 8 Tuercas para sujeción del bushing
- 9 Tapa del bushing
- 10 Conexión de alta tensión
- 11 Conexión del modelo a tierra
- 12 Medida del nivel de ruido
- 13 Válvula para control de la presión del cilindro

ESCUELA POLITECNICA NACIONAL MODELO CILINDRICO PARA PRUEBAS SOBRE EFECTO CORONA		
DISEÑO: P. ORBE	APROBO: Ing. A.MENA	ESCALA: 1:75
DIBUJO: P. ORBE	Noviembre de 1971	Fig. A.7

A P E N D I C E B

DEFINICION DE TERMINOS RELATIVOS A CORONA*

Ionización.- Proceso en el cual átomos o moléculas neutras se disocian en partículas cargadas positiva o negativamente. Las primeras son los iones positivos y las segundas, los iones negativos o electrones.

Descarga eléctrica.- Fenómeno que acompaña a una ionización en un dieléctrico y se produce como resultado de la aplicación de un campo eléctrico. Se distinguen dos clases de descargas:

a) descargas que una vez iniciadas, para continuar no requieren que una fuente externa entregue electrones o iones, son descargas que se mantienen por sí solas y requieren de un voltaje mínimo para su iniciación y su extinción.

b) descargas que para continuar necesitan que una fuente externa proporcione electrones o iones, son descargas que no se mantienen por sí solas y no tienen un mínimo voltaje crítico para su iniciación o extinción.

(*) L26.

Corona.- Descarga eléctrica auto mantenida en la que la intensidad de campo de ionización es localizada solo sobre una porción en el espacio entre electrodos. Esto puede deberse a un campo no uniforme como el que se presenta en el filo de los electrodos, puntos o alambres o en las superficies no uniformes de los conductores o porque el voltaje a través de dos o más dieléctricos en serie entre los electrodos no alcanza el mínimo valor crítico requerido para mantener por sí solo las descargas en el dieléctrico.

Pulsos de corona.- Descarga de corona que aparece y se extingue por sí sola en un corto período de tiempo (fracciones de microsegundo). A menudo esta propiedad de la corona es el resultado de la acumulación de cargas producidas por una descarga con una consecuente reducción del voltaje en la región descargada, bajo el valor crítico requerido para la extinción.

Corona continua.- Pulsos de corona que se producen a intervalos regulares durante períodos de algunos minutos o más.

Corona intermitente.- Pulsos de corona que se producen en intervalos regulares por períodos desde algunos ciclos del voltaje aplicado a segundos con períodos similares o mayores entre descargas.

Corona fluida.- Tipo de descarga de corona altamente localizada.

Voltaje de iniciación de corona.- Mínimo voltaje que debe aplicarse al sistema para que se inicie la corona continua.

Voltaje de extinción de corona.- Máximo voltaje aplicado al sistema en el que la corona continúa una vez iniciada, pero luego desaparece.

Carga aparente de un pulso de corona.- Cantidad de carga entregada a los terminales del sistema por la fuente de voltaje antes de que se produzca un pulso de corona. Se relaciona pero no es igual a la cantidad de carga que fluye en una descarga localizada.

Corriente aparente de corona.- Es la suma de las cargas de los pulsos aparentes de corona dividido para el tiempo de prueba.

Pérdidas por corona.- Potencia disipada en el sistema por las descargas de corona. Midiendo esta magnitud debe tenerse cuidado y asegurarse que las pérdidas dieléctricas son despreciables o puedan ser separadas.

Detector de corona.- Implemento para la detección de corona en una muestra. La sensibilidad del detector debe ser especificada para dar sentido a los resultados.

Ruido.- Señal indeseable, audible o no.

A P E N D I C E C

EQUIPOS UTILIZADOS

- EAT. Equipo de pruebas de alta tensión, 100 kV ac, 130/260 kV dc. Messwandler-Bau GmbH Bamberg/germany.
- OSC. Osciloscopio de rayos catódicos marca Tektronix. Tipo 561A. Portland, Oregon, USA.
- SLM. Medidor del nivel de ruido (Sound Level Meter). Type 1551-C. General Radio Company. West Concord, Mass. USA
- AO. Analizador de ondas (Wave Analyser). Mod. 302A. Hewlett Packard. California, USA.
- KV. Voltímetro capacitivo para medidas de tensión alterna mediante un divisor de tensión hasta 100 kV, incluido en el equipo de alta tensión.
Voltímetro YEW para medidas de tensión continua mediante un divisor de tensión resistivo hasta 140 kV.
- A. Amperímetro electromagnético AEG, 0,6/1,2/3/6 A.
- mA. Micro volt-amperímetro de continua (DC microvolt-ammeter) Hewlett Packard, Mod. 425A. California, USA.
- CD. Computador Digital IBM 11-30 International Business Machines Corporation. USA.
- Cámara fotográfica marca Tektronix, mod C-12, USA
Cámara fotográfica Mamiya/Sekor, mod 500TL, Japón.
- Películas: -Polaroid Land 3000 speed, tipo 47. Polaroid Corporation/Cambridge, Mass, USA.
-Kodak TRI-X Pan Film TX 402 35 mm.
-Kodak EX 135 20 ektachrome-X 35 mm.
Eastman Kodak Company, NY. USA.

B. I B L I O G R A F I A

- L1 Arnold Roth. Técnica de la Alta Tensión. (Hochspannungs-technik). Traducción de la cuarta edición alemana por Juan Corrales Martín. Editorial Labor S.A. 1966. ✓
- L2 F.H. Kreuger. Discharge Detection in High Voltage Equipment. A Heywood Book, Temple Bress Books Ltda, London, 1964. ✓
- L3 William Stevenson Jr. Elements of Power System Analysis. McGraw Hill, EU, 1962, 2nd Edition. ✓
- L4 W.O. Shuman & H. Prinz. Fortschritte der Hochspannungs-technik. (Adelantos en la técnica de la Alta Tensión). Tomo II. Munich 1954. ✓
- L5 Edison Electric Institute. EHV Transmission Lines Reference Book. Edison Electric Institute 1968. ✓
- L6 Rene Laurent. Materiales Electromagnéticos Modernos. Editorial Gustavo Hill S.A. Traducción del Francés por J. María Montero. 1952. ✓
- L7 W. E. Rogers. Introduction to Electric Fields. McGraw Hill Book Company, Inc. 1954, USA. ✓
- L8 Jorge del Castillo. Curso de Teoría Electromagnética. Escuela Politécnica Nacional, Quito, 1966-67. ✓
- L9 Guntram Lesh, Herausgegeben von E. Baumann. Lehrbuch der Hochspannungstechnik. (Técnica de la Alta Tensión) Springer-Verlag/Berlin/Göttingen/Heidelberg. 1959. ✓

- L10. Electric Transmission & Distribution Reference Book. Central Station Engineers of the Westinghouse Electric Corporation, Pennsylvania, USA, Co. 1964. 4th Edition. ✓
- L11 H. Waddicor. The Principles of Electric Power Transmission. Chapman and Hall Ltda. London EC 4. ✓
- L12 Jacinto Viqueira Landa. Redes Eléctricas. Representaciones y Servicios de Ingeniería. SA. México. DF. ✓
- L13 Berthold Gänger. Der Elektrische Durchschlag von Gasen Springer-Verlag/Göttingen/Berlin/Heidelberg. 1953. ✓
- L14 Sporn & P. Heroin. 42 01 Progress Report of Study Committee No. 9 (EHVAC Transmission). International Conference on Large Electric Systems at High Tension. 22nd Sesion. 1968 Cigré, Paris, Voll. II, 3hd Edition. ✓
- L14.1 Idem. R. Pélissier. I. Corona and Radio Interference Mechanism on EHV Lines. ✓
- L15 J.S. Forrest, P. Howard & D. Litter. Gas Discharges and the Electricity Supply Industry Proceedings of the International Conference held at the Center Electricity Research Laboratories, Leatherhead, Surrey, England, 7th-11th May, 1962. ✓
- L16 Archer E. Knowlton. Standard Hadbook for Electrical Engineers. W.W. Woodruff. Sec. 13 - Power Transmission. International Student Edition, 9th Edition. McGraw Hill Book Company, Inc. Tokio, Kogakusha Company Ltda. ✓
- L17 P.G. Petersen & Ervin E. Gross. Handbook of Noise Measurements. General Radio Company. West Concord, Mass. USA. Co. 1963, 5th Edition. ✓
- L18 American Society for Testing and Materials. ASTM Standards, Electrical Insulating Materials. Part. 29. Library of Congress, Baltimore USA. 1966. ✓
- L19 The Chemical Rubber Company. Standard Mathematical Tables. Cleveland, Ohio, USA. 14th Edition. Co. 1965. ✓

Papers

- L20 J.B. Whitehead Memorial, Lecture. The Mechanisms of the Electric Spark. Conference on Electrical Insulation Buck Hill Falls, Pennsylvania. October 1965. ✓
- L21 Wolfgang Hermstein. The Streamer Discharge and its Transition into Glow. High Frequency Institute of the Technical University in Berlin. ✓
- L22 Leonard. Loeb. Basic Phenomenological Concepts Covering the Electrical Corona in its Relation to the Problems of High Tension Transmission Lines. Department of Physics. Univ. of California, Berkeley, California. ✓
- L23 W.C. Pokorny, R. Schlomann, H. Barnes, C. Miller Jr. Investigation of Corona Effects from Wet Bundle Conductors for Applications to UHV Configurations. Transaction Paper. Feb. 1971. ✓
- L24 Ohio Brass Company. What is Corona. Ohio Brass Company Mansfield, Ohio. Publication No. 1619-H. USA. ✓
- Revistas
- L25 Francois Cahen. The Problems of Power Transmission at Voltage above 225 kV, II Problems of Corona: Power Losses. Beam Journal for the British Electrical Industry. October 1951. Pag. 314-27. ✓
- L26 AIEEE Working Group on Definitions. Definition on Terms Related to Corona. IEE Trans. Dec. 1963. Pag. 1044-59. ✓
- L27 M.C. Perz. Method of Evaluating Corona Noise Generation from Measurements on Short Test Lines. Dec. 1963. Pag. 833-44. ✓
- L28 C. De Bernochi & F. Di Lecce. Circuits and Apparatus for HVDC. Corona Measurements. Direct Current, November 1965. Pag. 155-61. ✓
- L29 Burt M. Bailey. Progress Report on BPA HVDC Test Lines Radio Noise and Corona Loss. IEE Trans. Vol: Pass-86, No. 10. Oct. 1967. Pag. 1141-45. ✓
- L30 T.N. Giao & J.B. Jordan. Modes of Corona Discharges in Air. IEE Trans. Vol 87, No. 5. May 1968, Pag.1207-15. ✓