

LAS ALTAS TENSIONES EN LA INGENIERIA ELECTRICA

Tesis previa a la obtención del título de Ingeniero en la especialización de Electrotecnia de la Escuela Politécnica Nacional.

ALFREDO MENA PACHANO

Quito, Julio de 1966

Certifico que este trabajo de Tesis ha sido
hecho por el Sr. Alfredo Mena Pachano bajo
mi dirección.

Carlo Behmann
Dr. Carlo Behmann
Consultor de Tesis

002174

Las Altas Tensiones en la Ingeniería Eléctrica

INDICE.	<u>Pág. No.</u>
-- <u>Prólogo.</u>	
-- <u>Capítulo primero.</u>	
Necesidad e importancia del uso de altas tensiones en el campo de las corrientes fuertes	1
1.- Aplicación en la producción, transmisión y distribución de la energía	1
2.- Factores técnicos y económicos	2
3.- Selección del voltaje para líneas de transmisión y distribución	5
4.- Ejemplos de utilización de las Altas Tensiones en sistemas de interconexión en Europa y América	10
-- <u>Capítulo segundo.</u>	
Teoría de la Alta Tensión	15
1.- Introducción.	
Fundamentos generales de la electrostática	16
a) Fuerzas eléctricas y cargas	16
b) Intensidad de campo eléctrico	18
c) Desplazamiento eléctrico	18
d) Potencial eléctrico y gradiente de potencial.	21
e) Campos eléctricos en distintos electrodos ...	23
2.- Materiales aislantes y propiedades dieléctricas.	
a) Clasificación y propiedades generales	33
b) Ruptura del dieléctrico	33
c) Dieléctricos en serie en los campos uniformes	35
d) El aire como aislante	37
e) Aceites aislantes	40
f) Aislantes sólidos.....	41
g) Pérdidas en los dieléctricos	42

	<u>Pág.</u>
<u>-- Capítulo tercero.</u>	
Ensayos en Alta Tensión	45
Introducción	45
1.- Ensayos con alta tensión alterna	46
Medición de la tensión	47
La medida de las pérdidas en los materiales aislantes	50
Medida de la rigidez dieléctrica de los aceites aislantes	53
Ensayos de aislamiento sobre materiales sólidos	55
a) Sobre máquinas eléctricas	58
b) Sobre equipos como:	
Disyuntores	60
Descargadores	61
Aisladores	62
c) Sobre muestras de materiales aislantes	63
2.- Ensayos con alta tensión continua	64
Generación y medición	64
3.- Ensayos con altas tensiones de choque o impulso	69
a) Definiciones	71
b) Generación de ondas de impulso en escala reducida	74
c) Generación de alta tensión de impulso	79
d) Medición de los voltajes de impulso	83
e) Ensayos	93
<u>--</u>	
<u>-- Capítulo cuarto.</u>	
Características del equipo de laboratorio para ensayos con alta tensión	101
a) Transformador elevador	101
b) Rectificadores	104

	<u>Pág.</u>
c) Condensadores	105
d) Resistores	106
e) Esferas espinterométricas	106
f) Divisores de potencial	108
g) Aparatos de medida y observación	109
h) Sistemas de control	112
Equipo instalado en la LFN de Quito	114
<u>-- Capítulo quinto.</u>	
Normas de ensayos	119
1.- Normas específicas para los ensayos	119
a) sobre transformadores	120
b) " aisladores	121
c) " máquinas eléctricas rotativas	122
d) " aceites	123
2.- Medidas de buen funcionamiento	123
3.- Medidas de seguridad	125
<u>-- Capítulo sexto.</u>	
Los peligros de la alta tensión y las medidas de seguridad	127
a) Generalidades	127
b) Aislamiento	129
c) Puesta a tierra	130
<u>-- Bibliografía.....</u>	136

Prólogo:

El estudio de las Altas Tensiones, es un campo en la ingeniería eléctrica, que todavía no puede considerarse como clásico. Se halla en un proceso de estudio e investigación y no se conocen hasta ahora cuáles son las leyes exactas que gobiernan a estos fenómenos. Como se ve, presenta un campo abierto al pensamiento y a la experimentación.

Este trabajo pretende, no entregar conocimientos nuevos, ya que no se han tenido suficientes medios para ello; sino más bien iniciar el estudio de esta rama de la ingeniería con una visión general del problema, tratando de darle una orientación principal sobre los ensayos de laboratorio más que sobre la explotación directa de las Altas Tensiones.

En cuanto a la bibliografía, hay que advertir que, más que para hacer citas directas de los libros, se la ha utilizado para dar una regularidad general a la parte teórica y presentar una fuente de información futura para quien desee profundizar más en el tema. La parte práctica en general, se la ha tomado de catálogos, instrucciones de servicio y boletines informativos de casas que manufacturan equipos de Alta Tensión.

Quiero aprovechar de estas páginas para agradecer principalmente a: mis padres a quienes debo mi formación; a la Escuela Politécnica y a todos mis profesores; al Dr. Carlo Behmann, bajo cuya dirección pude llevar a cabo el presente trabajo; y a todas las personas que en una u otra forma colaboraron conmigo.

Quito, 10 de julio de 1966

Alfredo Mena Pachano

LAS ALTAS TENSIONES EN LA INGENIERIA ELECTRICA

CAPITULO I

Necesidad e importancia del uso de Altas Tensiones en el campo de las corrientes fuertes.

1.- Aplicación en la producción, transmisión y distribución de la energía eléctrica.

Entre los campos de aplicación de las Altas Tensiones, el que ha llegado a tener mayor importancia es el de la generación, transporte y distribución de la energía eléctrica. Es inconcebible tener, hoy día, un sistema eléctrico eficaz de gran producción de energía sin el empleo de las Altas Tensiones.

En el caso de grandes producciones de energía hidráulica, se comprende perfectamente que la utilización total de esta energía no puede ser hecha al pie mismo de la planta generadora por el hecho de que este tipo de centrales se hallan ubicadas generalmente lejos de las zonas urbanas e industriales. Esta energía debe ser utilizada en una gran extensión, lo que implica que tienen que construirse líneas de transporte más o menos largas para unir los centros de consumo con la central.

En cuanto a la generación de energía por métodos "térmicos", sabemos que el carbón, el petróleo y otros combustibles pueden transportarse por ferrocarril, barco u oleoductos; esto permite una ubicación más cerca del lugar de consumo, no obstante, debido a la gran potencia de estas centrales y a la interconexión, resulta indispensable el empleo de la alta tensión.

Para facilitar la distribución de la energía

y conseguir mayor seguridad de un servicio continuo, se interconectan unas centrales con otras del mismo país o de países vecinos utilizando largas líneas de transmisión.

En este trabajo se trata de hacer un estudio sobre la importancia de utilizar elevadas tensiones en estos procesos de generación, transporte y distribución de la electricidad. Observando las instalaciones actuales, puede verse que cada vez se tiende a tensiones más y más elevadas; por tanto, es necesario conocer las razones de este proceso, las aplicaciones; el comportamiento y el manejo de las tensiones elevadas; y por último los equipos con que se controlan estas enormes diferencias de potencial.

2.- Factores técnicos y económicos.

La justificación del uso de tensiones elevadas en los procesos de generación, transmisión y distribución de la energía eléctrica, se halla fundamentada en los factores técnicos y económicos que se exponen a continuación.

La eficiencia de la transmisión se incrementa con el voltaje, es necesario, en consecuencia, analizar las posibilidades de pérdidas y la interrelación que hay entre ellas y el voltaje, para probar esta afirmación.

Tanto los conductores como los aisladores contribuyen a la pérdida total de potencia y energía en una línea. Las pérdidas en los conductores son proporcionales al cuadrado de la corriente; y las pérdidas en los aisladores son despreciables, debido a la perfección con que son contruídos y a la calidad de los materiales utilizados; lo que significa que el voltaje puede ser eleva-

do teóricamente sin límite. Como la potencia llevada por una línea de transmisión es proporcional al producto del voltaje y la corriente ($P=V \times I$), elevando el primero se hace posible disminuir la corriente para una potencia dada. A la reducción "lineal" de la corriente, corresponde una reducción "cuadrática" de las pérdidas a lo largo del conductor aumentándose rápidamente de esta manera el rendimiento de la instalación.

Las pérdidas por efecto Joule; (potencia radiada en forma de calor) en un sistema trifásico en el que "R" es la resistencia óhmica por fase; son:

$$P_j = 3 \cdot I^2 \cdot R \quad (1)$$

siendo "I" la corriente en amperios que circula por cada línea..

La potencia trifásica del sistema sería::

$$P = 3 \cdot U \cdot I \cdot \cos \phi \quad (2)$$

siendo naturalmente "U" la tensión entre líneas y "cos ϕ " el factor de potencia de la carga.

Relacionando las ecuaciones (1) y (2) podemos decir que las pérdidas por efecto Joule serán:

$$P_j = \frac{P^2}{U^2} \cdot \frac{R}{(\cos \phi)^2} \quad (3)$$

Esto nos indica que la cantidad de calor perdida en una línea es directamente proporcional al cuadrado de la potencia a transmitir "P" y a la resistencia óhmica "R"; e inversamente proporcional al cuadrado de la tensión "U" y al cuadrado del factor de potencia.

Mientras mayor es el voltaje de transmisión, menor resulta la corriente de línea, por tanto se re-

ducen las pérdidas por I^2R como aparece en la ecuación (1).

Los factores técnicos mencionados antes tienen una íntima relación con la operación económica de las líneas. La justificación del uso de tensiones muy elevadas está precisamente basada en la relación que existe entre la corriente que circula por los conductores y las pérdidas de potencia por efecto Joule.

El aspecto más importante en el diseño es la determinación del calibre del conductor y es para esto precisamente que se hace una consideración económica que en electricidad se llama la ley de Kelvin; esta ley establece que el tamaño económico es aquel para el cual las cargas anuales de inversión adicional, igualan exactamente al costo adicional anual de la energía perdida. En otras palabras, no es conveniente reducir las pérdidas en el conductor escogiendo un calibre más grande si el costo añadido es superior al valor total de la energía ahorrada. Es por esta razón que resulta altamente conveniente aumentar la tensión ya que de este modo se pueden reducir a la vez las pérdidas y el calibre del conductor para una potencia a transmitir fija y una longitud de línea constante.

Si una carga definida tiene que ser transmitida a una distancia dada, el escoger el voltaje de servicio y la sección transversal del conductor, y posiblemente el número de circuitos paralelos, viene a ser un problema de determinar el mínimo costo anual para el transporte de la energía, escogiéndose, de acuerdo a esto, los parámetros más importantes. Estos cargos anuales están compuestos por los cargos de capital de la lí-

nea (") (con sus estaciones, subestaciones y demás elementos necesarios) y por los costos relacionados con las pérdidas en los conductores y aisladores. Este problema tiene solución puesto que a la vez que los cargos de capital aumentan con el incremento del voltaje, las pérdidas disminuyen. Se trata entonces de encontrar el punto "optimum".

Investigaciones económicas han dado como resultado que la potencia transmitida se incrementa con el voltaje de servicio al cuadrado. Mientras mayor es la carga transmitida por un circuito, se hace menor el costo de transmisión por Kilowatio y por Kilómetro; previsto, por supuesto, que el voltaje de servicio depende de la carga, (Fig. I-1). La transmisión a largas distancias es por tanto justificable únicamente para cargas pesadas y a voltajes extremadamente altos.

3.- Selección del voltaje para línea de Transmisión y Distribución.

El Voltaje de línea escogido, depende principalmente de balancear la inversión inicial en la construcción de la línea y de los aparatos; con el costo de operación. Arriba de cierto punto, el incrementar el voltaje resulta en menores pérdidas para un tamaño dado de conductor, o en un conductor más pequeño, (sección transversal), para una pérdida de potencia determinada. Mucho del ahorro conseguido en el costo del conductor al ser diseñada la línea por altos voltajes, se pierde al incrementarse las pérdidas en el aire y aislamientos, (motivadas por la ionización del aire y por la capacitan-

(") Estos cargos de capital tienen el nombre genérico de amortización o depreciación de equipos y materiales.

cia de la línea); y además por el costo de aisladores, transformadores, switches, disyuntores, etc. El costo de estos últimos se incrementa tan rápidamente para altos voltajes, que debe existir algún voltaje máximo encima del cual no resulte económico diseñar la línea en el presente.

Otro de los factores importantes, que influye sobre todo en las áreas urbanas, es el costo de obtener "derecho de vía" para nuevas líneas de potencia. Como la capacidad de carga de una línea se incrementa con el voltaje, algunas empresas han encontrado económico elevar al siguiente nivel superior de voltaje haciendo de este modo más eficiente el uso de los derechos de vía existentes.

En general las ventajas de un voltaje más elevado estarían resumidas así:

- a) Si la distancia a transmitir, la potencia, el factor de potencia y las pérdidas de potencia son fijas, el peso total del conductor varía inversamente con el cuadrado del voltaje de transmisión.
- b) Si se tiene un tamaño dado de conductor (sección transversal) y si la potencia, factor de potencia, y pérdidas son fijas; el voltaje de transmisión variará en proporción directa a la raíz cuadrada de la distancia a transmitir. (En otras palabras la distancia es función del cuadrado del voltaje).

Las afirmaciones anteriores provienen del hecho de que la resistencia óhmica de un conductor es directamente proporcional a su longitud e inversamente pro-

(TG-03-16)

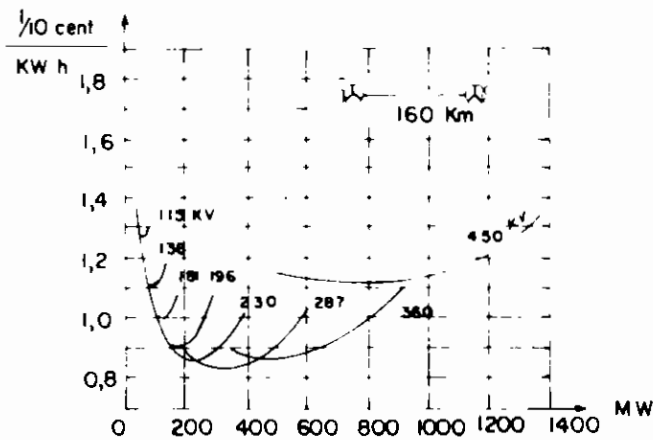
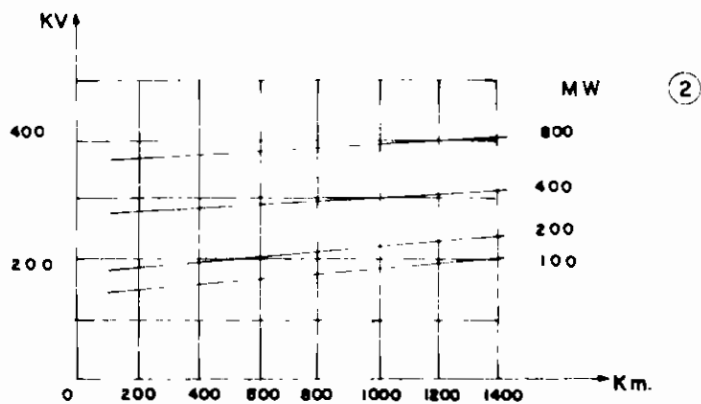


DIAGRAMA QUE INDICA LA DISMINUCION DEL COSTO DE KW.h. TRANSMITIDO, EN UNA LINEA DE LONGITUD CONSTANTE, A MEDIDA QUE SE AUMENTA LA TENSION.

TG-03-16



INFLUENCIA DEL AUMENTO DE LA TENSION EN LA CARGABILIDAD DE UNA LINEA. LA TRANSMISION A LARGA DISTANCIA SE JUSTIFICA UNICAMENTE PARA CARGAS PESADAS Y VOLTAJES EXTREMADAMENTE ALTOS (E.H.V.)

Fig.I-1

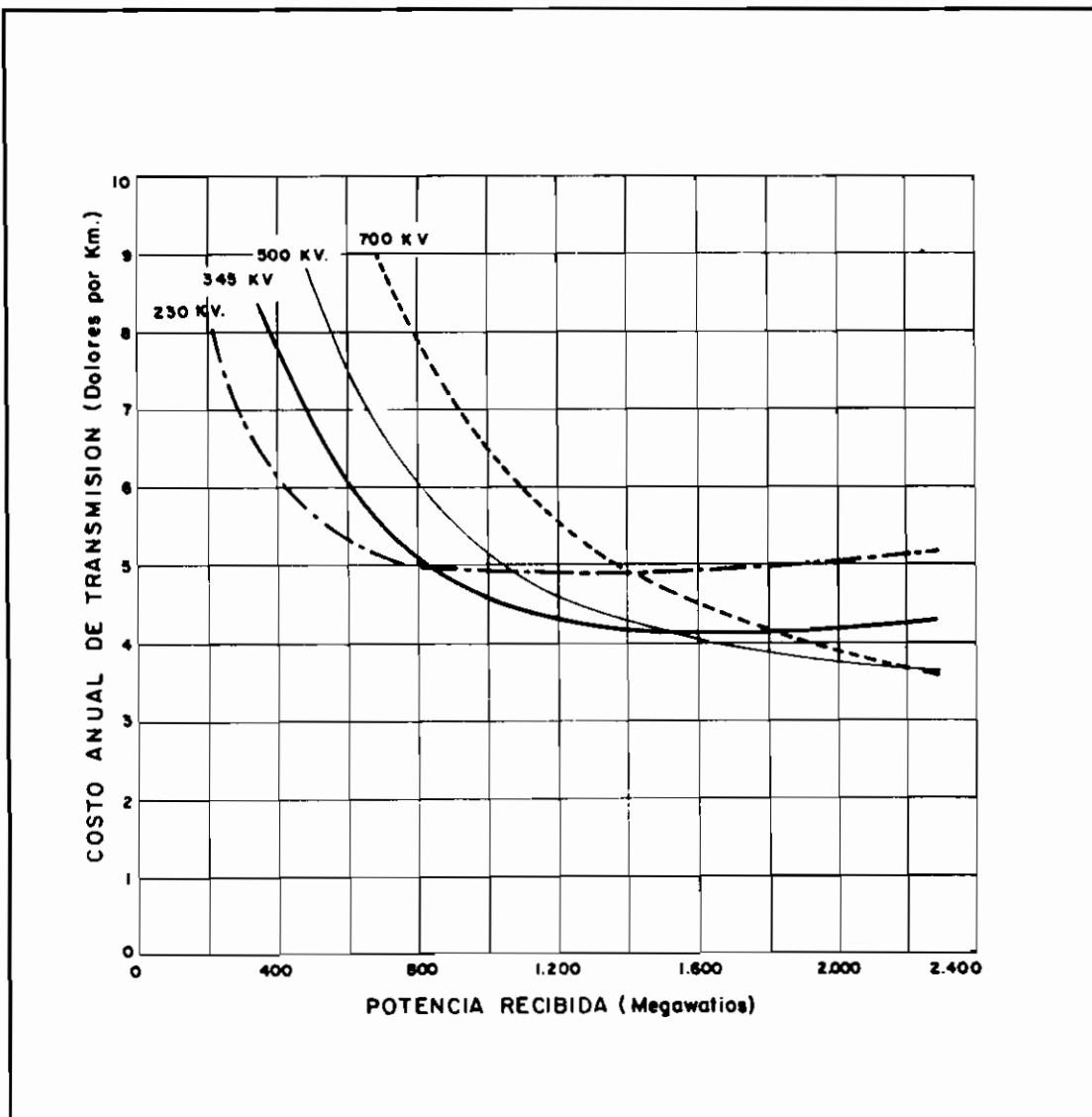


Fig. I-3.- La cantidad de potencia que tiene que ser transmitida es una variable muy importante en el análisis de costos como se indican en estas curvas para distintos voltajes. Todas están basadas en un mínimo de 2 circuitos con 100 millas de longitud. Un sistema a 230 kV. requiere tres circuitos sobre los 1100 megawattios y cuatro sobre los 1500. Un sistema de 345 kV requiere de un tercer circuito sobre los 2000 megawattios.

(Scientific American)

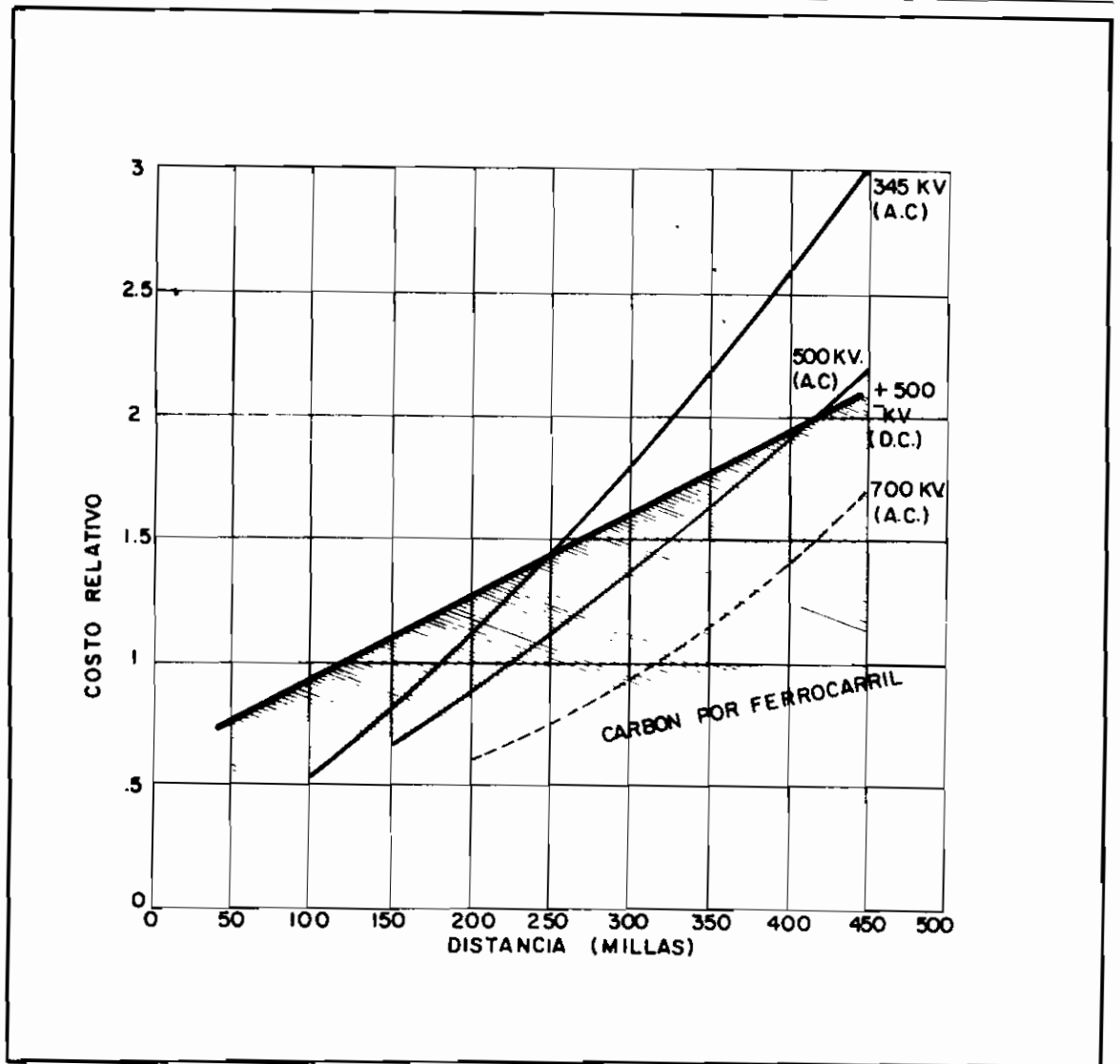


Figura I-4.- El costo del transporte de energía se muestra en este gráfico para la electricidad y el carbón por ferrocarril. Una línea de 700 kv. puede llevar cuatro o cinco veces la potencia que puede llevar una línea de 345 kv. Los menores costos que se obtienen para el carbón, se deben a que se usan trenes que llevan únicamente carbón.

(Scientific American)

porcional a su sección transversal. El factor de proporcionalidad se llama resistividad del material, (ρ).

$$R = \rho \cdot \frac{L}{S} \quad (\Omega) \quad (4)$$

El peso es, obviamente, proporcional a la sección y a la longitud, por tanto para una distancia constante:

$$R \sim \frac{L}{S} \quad W = \text{peso} \quad (5)$$

como las pérdidas de potencia, (que se consideran constantes), son:

$$P_j \sim I^2 \cdot R \quad (\text{wattios}) \quad (6)$$

y además la corriente es directamente proporcional a la tensión e inversamente proporcional a la resistencia (a corriente continua) ley de Ohm), podríamos finalmente deducir que:

$$y \quad P_j \cdot R = U^2 \cdot K$$
$$W = \frac{K}{U^2} \quad (\text{peso}) \quad (7)$$

4.- Ejemplos de la utilización de Altas Tensiones en sistemas de interconexión en Europa y América.

En los Estados Unidos el voltaje de operación se incrementó rápidamente. En 1890 la línea Willanette-Portland operaba a 3.300 voltios. A partir de 1907 el voltaje creció desde 100 Kv. hasta 150 Kv. en 1913; hasta 220 Kv. en 1923, y hasta 287 Kv. en la línea Hoover Dam a Los Angeles que empezó a funcionar en 1936. En 1953 la American Electric Power Company puso en operación la primera línea del sistema de 345 Kv. originalmente planeado para 300/315 Kv.

A finales del año 1964 había más de 3.600 mi-

llas en líneas de 345 Kv. y en el año de 1965 empezó a funcionar la primera línea de 500 Kv. en Estados Unidos y Canadá, (de un total de mil millas en construcción). También empezó a funcionar, el mismo año, la primera sección de un grupo de tres de 350 millas cada una a la tensión de 735.000 voltios construídas por la Quebec Hydro Electric Commission para llevar energía (de fuentes hidráulicas), a Quebec y Montreal, (Fig.I-5). Se está discutiendo actualmente la posibilidad de construir líneas a 1.000 kv. y en Francia se está construyendo una línea experimental de 1.100 kv.

Suecia fue el primer país europeo en emplear voltajes extra altos (E.H.V.) en transmisión. En 1952 fueron puestas en servicio líneas de 400 kv. para llevar energía de origen hidráulico una distancia de más de 600 millas desde el norte a los centros de consumo en el sur. Además en los últimos años, Suecia, Noruega, Finlandia, Francia y Alemania han tenido líneas de 400 kilovoltios en operación continua.

En la Unión Soviética entró en servicio en 1959 una línea de 500 kv. y se empezó a experimentar con 750.000 voltios, (en una línea de 100 km. de largo, en 1964).

Todas estas líneas están diseñadas para corrientes alternas, pero recientes estudios están probando que la transmisión con corriente continua es más barata cuando se quiere llevar grandes potencias sobre grandes distancias.

En 1962, la U.R.S.S. puso en operación una línea de alta tensión a corriente continua de una longitud de 200 millas que ha estado trabajando intermitentemente a \pm 200 kv.(o 400 kv. entre conductores). Existen planes, actualmente en estudio, en Rusia para una línea

de 1500 millas operando con un voltaje con respecto a tierra de 750 kV. (1500 kV. entre líneas). Esta línea servirá para unir un complejo de estaciones generadoras que van a ser construídas en Ekibastus con el propósito de aprovechar los yacimientos de carbón que hay en esta zona. A más de esta línea de continúa se enviará potencia a los Urales mediante una línea de 750 kV. de corriente alterna. El sistema estará completo en 1980 y generará unos 158.000 millones de kwh cada año, con varias centrales de capacidad instalada de 15 a 18.000 Mw.

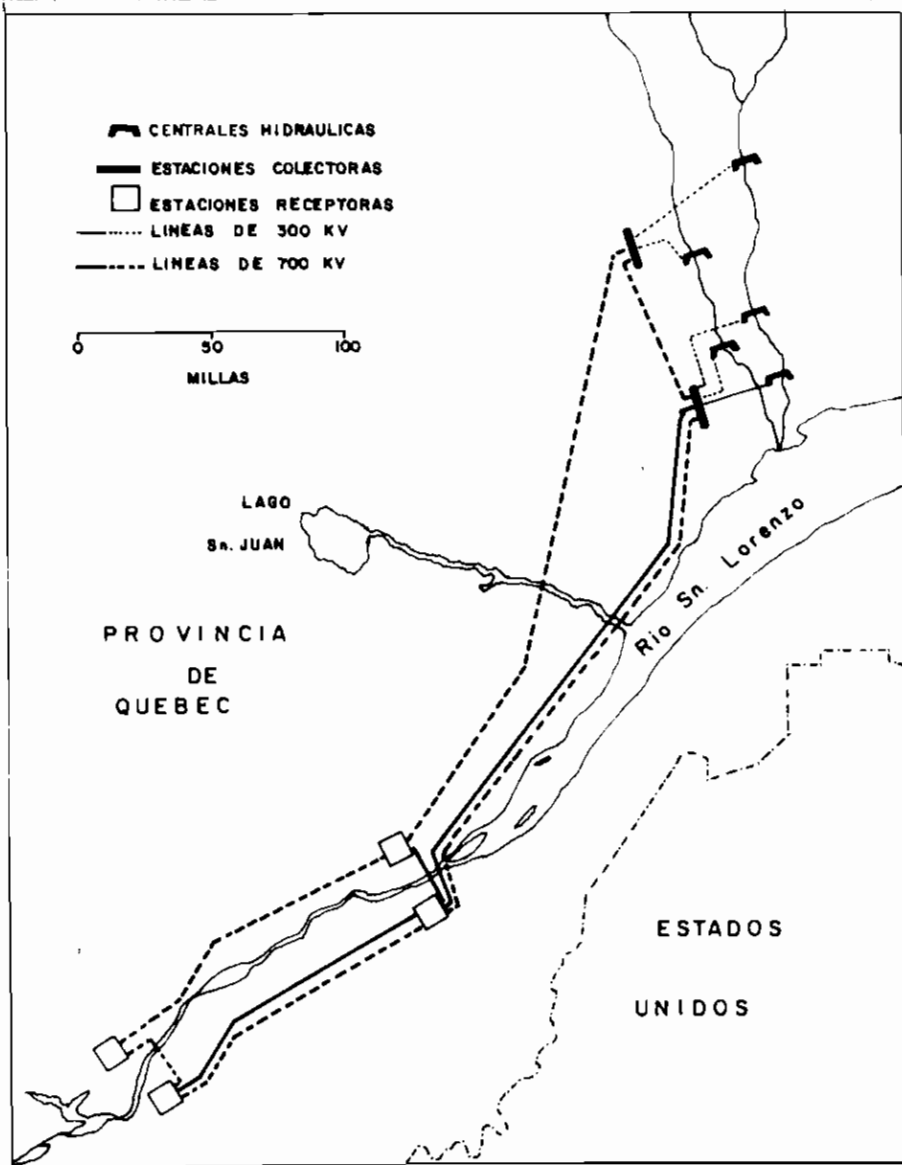


Figura I-5.- Esta figura representa la línea canadiense a 700 kV. que llevará corriente alterna desde las plantas hidroeléctricas al norte de Quebec, a las ciudades de Quebec y Montreal. Las primeras 1000 millas estarán terminadas para 1970 y se estima que habrán 5000 millas en 1985. Las líneas seguidas representan lo que se está construyendo y las punteadas lo que se proyecta para 1970. Este es uno de los primeros proyectos no experimentales que están utilizando tensiones alternas tan elevadas.

(Scientific American)

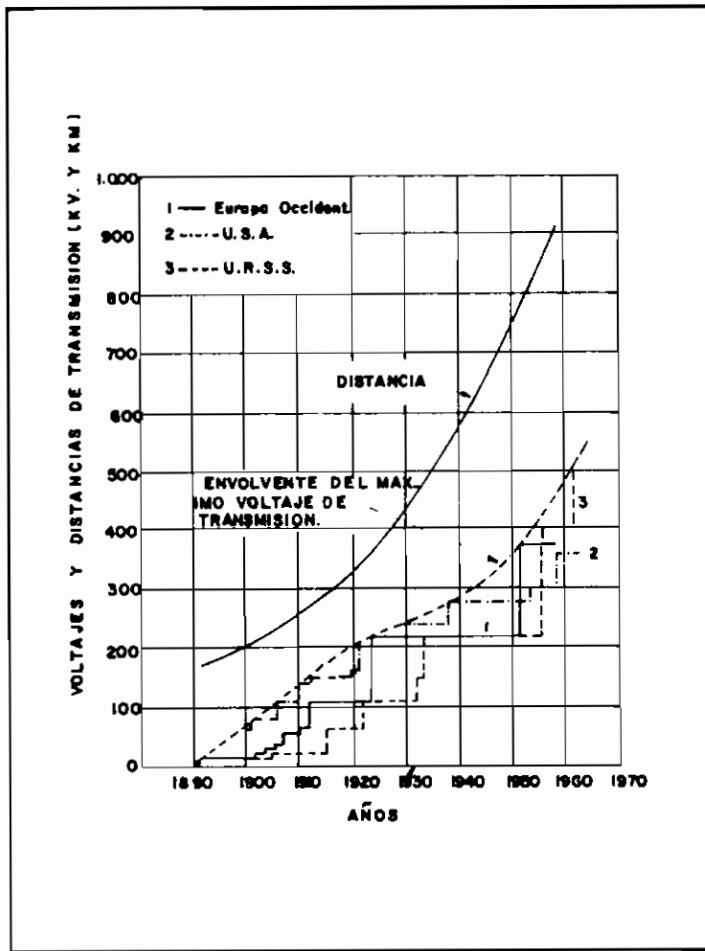


Figura 106.- Diagrama en que se indica el crecimiento de los voltajes y distancias de transmisión a partir del año de 1890. En este gráfico hay que tener en cuenta que en los últimos años (a partir de 1960) se ha dado un salto muy grande al pasar de unos 500 kV. hasta 700 kV o más en algunas partes.

(Electrical Review 29-I-65)

CAPITULO II

Teoría de la Alta Tensión:

I.- Introducción:

Al hacer el estudio del comportamiento de las Altas Tensiones y sobre todo de los métodos que se utilizan para experimentar con ellas, se hace imprescindible una introducción teórica. Esta tiene por objeto, únicamente, proporcionar una herramienta para poder analizar los fenómenos desde un punto de vista real y que se ajuste a las fundamentales leyes físicas.

Para hacer este análisis debemos considerar los siguientes elementos fundamentales:

a) La electricidad en sí, o sea ese fenómeno físico que a más de tener su propia causa; es la razón de ser, de muchos otros fenómenos que se relacionan entre sí. Estos, sin profundizar mucho y sin ser tampoco exhaustivos, son: el campo eléctrico y el campo magnético, con sus relaciones de potencial, gradiente, fuerza mecánica, energía, etc.

b) Las disposiciones geométricas básicas de ciertos elementos que son utilizados para conducir, detener o alterar el flujo de la electricidad y que permiten estudiar y manejar las Altas Tensiones y los campos electromagnéticos que éstas producen.

c) Los materiales en general, considerando sus propiedades físicas, que se hallan sometidos por su función específica a los efectos de la electricidad. Son éstos, los conductores y los aisladores bajo esfuerzos mecánicos o eléctricos y son los elementos sobre los cuales se hacen generalmente los ensayos.

Siguiendo un orden, y para limitar este capítulo a los requerimientos del tema principal se lo va a

tratar de la siguiente manera:

- 1.- Fundamentos generales de la electrostática, en que se hace un análisis breve de los párrafos a) y b) mencionados antes.
- 2.- Materiales aislantes y propiedades dieléctricas, para completar el estudio hacia el párrafo c); en que se tratará de la rigidez dieléctrica, de las pérdidas y de las descargas a través de aislantes en general.

1.- Fundamentos generales de la Electrostática:

a) Fuerzas eléctricas y cargas:

Si tenemos una carga eléctrica elemental, o un conjunto de cargas en una configuración geométrica, podemos observar que en el espacio libre que las rodea se siente en mayor o menor grado su influencia. A este espacio de influencia en que se sienten las manifestaciones eléctricas de las cargas y que se extiende en forma radial desde el centro hasta el infinito, se lo llama campo eléctrico.

El estudio de este campo y de las relaciones que hay en él es de suma importancia cuando se trata de Altas Tensiones, ya que al elevar el voltaje se obtiene una gran acumulación de cargas en un punto, (con respecto a otros), y se producen campos eléctricos de gran intensidad que influyen sobre los elementos que se encuentran dentro de él.

Ley de Coulomb: Observaciones experimentales de las fuerzas entre dos cargas puntiformes revelan que las cargas del mismo signo se repelen y las de distinto signo se atraen con una fuerza que sigue siempre una ley determinada. Si tenemos dos cargas de signo positivo como en la figura II-1, colocadas en el espacio

libre, la fuerza " \vec{F} ", (magnitud vectorial), viene dada por

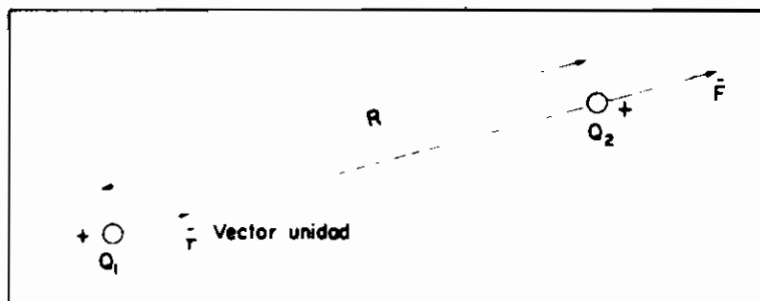


Fig.II-1

$$\vec{F} = k \frac{Q_1 \cdot Q_2}{R^2} \cdot \vec{r} \quad (1)$$

En donde:

Q_1 y Q_2 = magnitud de las cargas

R = separación de las cargas

\vec{F} = fuerza

\vec{r} = vector unidad

k = constante que depende del medio en que se hace la prueba.

Para que la fuerza venga dada en Newtons, debemos tener las cargas en Coulombios y la distancia en metros. En esta ecuación conocida como la ley de Coulomb, el factor de proporcionalidad " k " utilizando el sistema MKS racionalizado equivale a:

$$k = \frac{1}{4\pi e} \quad (2)$$

El símbolo " e " denota una propiedad del medio y su nombre genérico es "permitividad" o constante dieléctrica. Su valor para el vacío o el espacio libre es $e_0 = 1/36\pi 10^9$. (valor experimental).

Generalmente se tienen campos eléctricos complejos formados por la presencia de muchas cargas que

ejercen su influencia unas sobre otras de acuerdo con su propia polaridad. Las fuerzas resultantes se determinan fácilmente haciendo una sumación de vectores para cada uno de los cuales se aplica la ley de Coulomb.

$$F_{ak} = \sum_{k=1}^n \frac{Q_a Q_k}{4\pi \epsilon_0 R_{ak}^2} \cdot \vec{r}_{ak} \quad (3)$$

b) Intensidad de campo eléctrico.

Siguiendo el método tradicional de análisis podemos utilizar una carga de prueba Q_t lo más pequeña posible para estudiar los efectos que sobre ésta produce otra carga aislada en el espacio.

En cualquier punto del espacio, Q_t va a sentir los efectos de cualquier otro punto de carga y la fuerza será el vector suma de las distintas resultantes determinadas por la ley de Coulomb.

$$\vec{F}_t = \frac{Q_a Q_t}{4\pi \epsilon_0 R_{at}^2} \cdot \vec{r}_{at} + \frac{Q_b Q_t}{4\pi \epsilon_0 R_{bt}^2} \cdot \vec{r}_{bt} + \dots + \frac{Q_n Q_t}{4\pi \epsilon_0 R_{nt}^2} \cdot \vec{r}_{nt} \quad (4)$$

Para poder conocer el efecto de la carga o cargas que se encuentran en el espacio sin que se vean influenciados por la magnitud de Q_t , podemos encontrar la fuerza específica o por unidad de carga dividiendo para Q_t . A este cociente resultante lo llamamos intensidad de campo "E".

$$E = \frac{\vec{F}_t}{Q_t} \quad (\text{V/m}) \quad (5)$$

Luego la fórmula que nos permite calcular la intensidad de campo debida a cualquier número de cargas será:

$$E = \sum_{k=1}^n \frac{Q_k}{4\pi \epsilon_0 R_{kt}^2} \vec{r}_{kt} \quad (\text{V/m}) \quad (6)$$

c) Desplazamiento eléctrico:

Al estudiar los campos eléctricos se observa que tiene que haber algo que "emana" de las cargas positivas y que es lo que produce el efecto de fuerza sobre las otras cargas. A este algo se lo llama flujo eléctrico y se lo representa con la letra griega " ψ ".

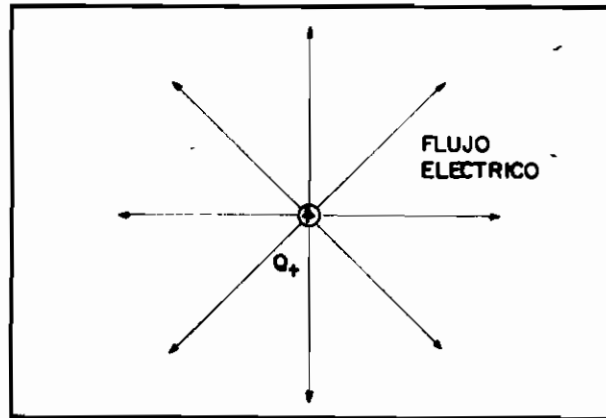


Fig.II-2

Al flujo eléctrico se lo considera completamente independiente del medio que rodea a la carga y su valor depende únicamente de la carga, por tanto podemos aceptar que:

$$\psi = Q \quad (\text{Coul.}) \quad (7)$$

De la misma manera que al tratarse de la circulación de corriente en un conductor hablamos de la densidad de corriente (Coul..seg/m²), aquí podemos también hablar de una densidad de flujo eléctrico (Coul./m²) que a pesar de no cumplir las mismas condiciones físicas que la densidad de corriente, satisface los requerimientos necesarios para estudiar los campos eléctricos. Su comportamiento es el de un vector, y por definición su valor absoluto viene dado por:

$$\bar{D} = \frac{d\psi}{dA} \quad \begin{array}{l} \psi = \text{flujo eléctrico} \\ A = \text{área} \end{array} \quad (8)$$

Su escritura en forma vectorial sería:

$$d\psi = \vec{D} \cdot \vec{n} \, dA \quad (9)$$

Un área la podemos expresar en forma vectorial multiplicando su magnitud por un vector unidad " \vec{n} " normal a la superficie.

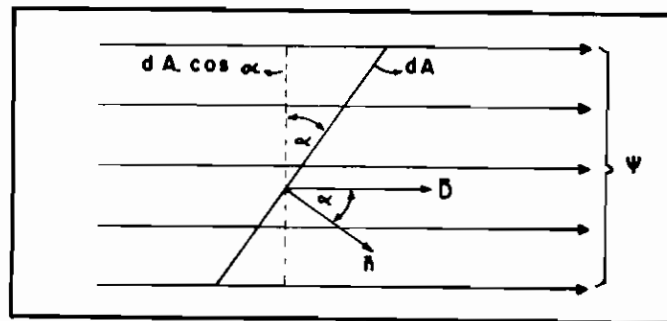


Fig. II-3

En el caso de la figura II-3, no tenemos problema en determinar el valor del flujo

$$\psi = \int_A \vec{D} \cdot \vec{n} \, dA \quad (10)$$

Pero cuando se trata de una superficie esférica o simplemente superficie cerrada, tenemos que buscar la integral cerrada y cambiar el valor absoluto del flujo por el sumatorio de la magnitud de las cargas en su interior:

$$\psi = \sum Q = \oint \vec{D} \cdot \vec{n} \, dA \quad (11)$$

Esto se llama la ley de Gauss y puede enunciarse así:

"El flujo neto que sale a través de cualquier superficie cerrada, es igual a la carga neta positiva dentro del volumen encerrado por dicha superficie".

Conocida la ley de Gauss, podemos escribir una ecuación que defina al vector desplazamiento eléctrico, (densidad de flujo), en función de la carga y de la superficie:

$$|D| = \left| \frac{Q}{A} \right| \quad (12)$$

pero considerando las superficies equipotenciales como esferas tenemos:

$$A = 4 \pi R^2 \quad (m^2) \quad (13)$$

por tanto:

$$D = \frac{Q}{4 \pi R^2} \cdot \overline{r} \quad (14)$$

Si a esta ecuación la comparamos con aquella de la intensidad de campo, podemos notar que la única diferencia es la de un factor constante que como ya lo habíamos especificado antes, tiene un nombre genérico de permitividad.

$$D = e \cdot \overline{E}$$

$$D = e_r e_0 \cdot \overline{E} \quad (15)$$

d) Potencial eléctrico y gradiente de potencial:

Hagamos que una carga diferencial de prueba dQ_t , (positiva), se mueva a lo largo de una línea que es radial a la carga "Q", desde una distancia $(R+dR)$ a la distancia R , como se ilustra en la figura II-4-

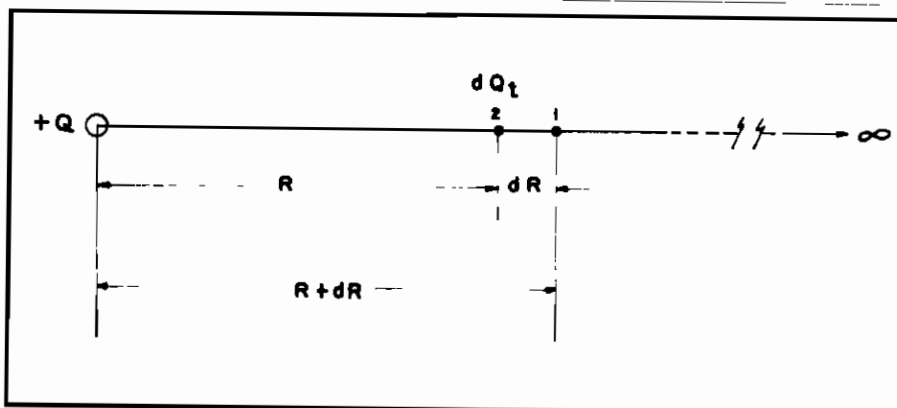


Fig.II-4

La distancia que la carga diferencial se ha movido es $(-dR)$ como consecuencia de la diferencia de

distancias a los puntos "1" y "2"; ahora si nosotros consideramos que en todo campo eléctrico hay una fuerza y que en este caso se produce un trabajo al haber desplazamiento, tenemos:

$$\text{fuerza:} \quad dF_t = \frac{Q \cdot dQ_t}{4 \pi e_0 R^2} \quad (16)$$

$$\text{trabajo:} \quad dW_t = dF_t (-dR) = \frac{Q \cdot dQ_t (-dR)}{4 \pi e_0 R^2} \quad (17)$$

y si además suponemos que la carga de prueba ha sido traída desde el infinito hasta una distancia "R" de la carga, el trabajo sería:

$$dW_t = \int_{R=\infty}^{R=R} \frac{Q \cdot dQ_t (-dR)}{4 \pi e_0 R^2} \quad (18)$$

al realizar esta integral tenemos:

$$dW_t = \frac{Q \cdot dQ_t}{4 \pi e_0 \cdot R} \quad (19)$$

Si buscamos la relación del trabajo realizado para traer una carga desde el infinito a un punto dado, a esta carga diferencial positiva", tenemos el concepto de potencial eléctrico absoluto.

$$\phi_a = \frac{dW_t}{dQ_t} = \frac{Q}{4 \pi e_0 R_a} \quad (\text{voltios}) \text{ ó } (\text{Joules/Coul}) \quad (20)$$

La diferencia de potencial entre dos puntos será por tanto la diferencia de los potenciales absolutos:

$$\phi_a - \phi_b = \frac{Q}{4 \pi e_0} \left(\frac{1}{R_a} - \frac{1}{R_b} \right) \quad (v) \quad (21)$$

Gradiente de Potencial:

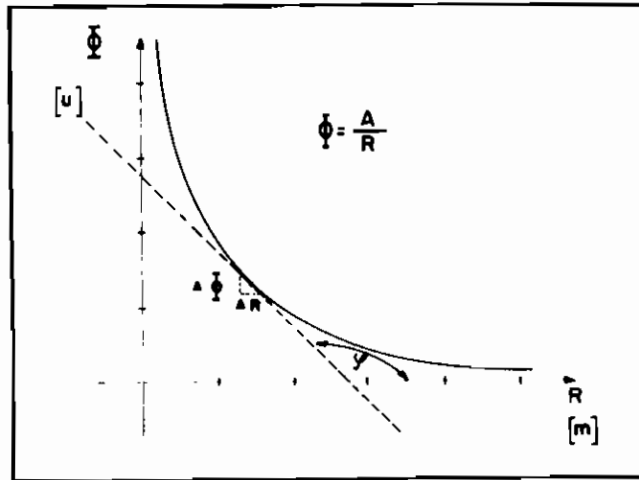


Fig. II-5

Según se puede observar en la figura II-5, la función "potencial" es una hipérbola y en esta curva, a la razón de cambio de potencial con respecto a la distancia la llamamos "gradiente de potencial". En ésta, una definición puramente matemática, que viene a estar representada por la derivada de la función con respecto a la distancia, siendo esta distancia normal a las superficies equipotenciales. Desarrollando la derivada obtenemos:

$$\frac{d\Phi}{dR} = -E \quad (22)$$

e) Campos eléctricos en distintos electrodos:

Una vez que tenemos una idea básica de las leyes de los campos eléctricos con la introducción anterior, podemos estudiar su comportamiento alrededor de electrodos con formas geométricas definidas o indefinidas y conocer cual es la influencia de estas formas en la configuración de las líneas de fuerza, de potencial y de intensidad de campo.

-Campo eléctrico de una esfera aislada en el aire:

Tengamos una esfera conductora de radio R y que se encuentra cargada uniformemente con una carga superficial de " σ " (Coul/m²).

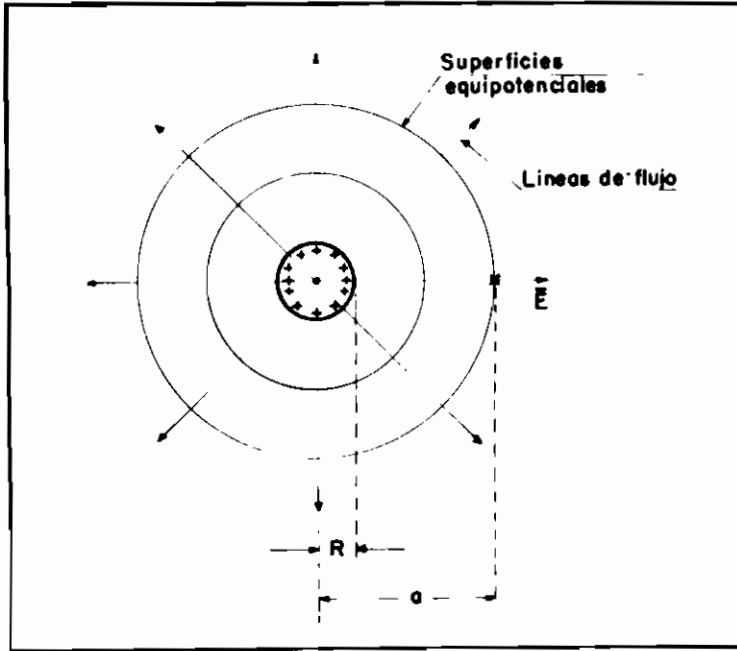


Fig.II-6

Como es una figura simétrica, el valor de " σ " es constante y la carga total podría escribirse: $Q = \sigma (4\pi R^2)$. Esta carga, de acuerdo con la ley de Gauss la podríamos escribir como concentrada en el centro de la esfera, según esto la densidad de flujo eléctrico a una distancia "a" de la carga sería:

$$\vec{D} = \epsilon_0 \vec{E} = \frac{Q}{4\pi a^2} \vec{r}$$

de modo que:
$$\vec{E} = \frac{Q}{4\pi \epsilon_0 a^2} \vec{r} \quad (\text{v/m}) \quad (23)$$

Esta ecuación que representa al vector de la intensidad de campo está limitado únicamente por la ley

de Gauss, es decir será verdad siempre y cuando $a \gg R$. Es de importancia grande, sobre todo para explicar el fundamento de la "jaula de Faraday" el conocer el valor de la intensidad de campo y del potencial en el interior de una esfera conductora cargada uniformemente en su superficie; es decir la condición que habrá de satisfacer será: $a < R$.

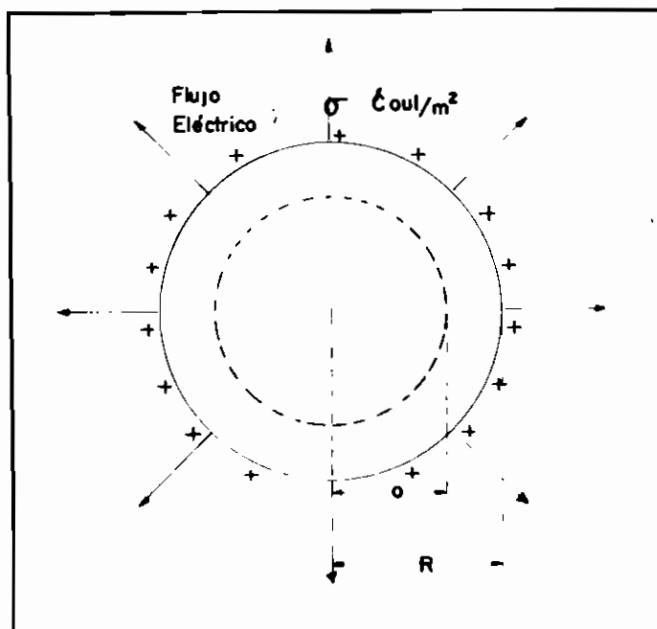


Fig. II-7

En la figura II-7. consideremos una esfera imaginaria de radio $a < R$. Como podemos observar, la carga encerrada en ella es "cero"; por tanto, según la ley de Gauss, el flujo que atraviesa esta superficie también es cero. Consecuentemente sobre el área $4\pi a^2$ la densidad de flujo será nula y el campo eléctrico también tiene un valor de cero. La consideración anterior es cierta únicamente cuando se satisface la condición de que las cargas estén sobre o exteriormente a la esfera de radio "R".

El potencial absoluto dentro de la esfera sería un valor constante ya que según la gradiente de potencial: $E = - d\phi/da = 0$; solamente la derivada de un valor constante es igual a cero, por tanto:

$$\phi = \frac{Q}{4 \pi e_0 R} \quad (v) \quad (24)$$

Campo eléctrico de un conductor aislado en el aire:

Tengamos un conductor de longitud teóricamente infinita y con una carga uniformemente distribuida " λ " (Coul/m). A una distancia R del conductor podemos registrar una intensidad de campo resultante de las causadas por elementos de carga $dQ = \lambda dl$ a lo largo de la línea. Esta resultante de campo (vector) la vamos a llamar \bar{E}_{nt} porque tiene una dirección normal al eje del conductor en el punto considerado.

El desarrollo matemático siguiente, nos permite conocer el valor de \bar{E}_{nt} y además con sólo cambiar los límites de integración podemos conocer la intensidad de campo para cualquier pedazo de conductor aislado en el aire y cargado uniformemente. Figura II-8

$$|d\bar{E}| = \frac{dQ}{4 \pi e_0 (R^2 + l^2)} = \frac{\lambda dl}{4 \pi e_0 (R^2 + l^2)}$$

$$|d\bar{E}_n| = dE \text{ sen } \alpha$$

$$|d\bar{E}_n| = \frac{\lambda \text{ sen } \alpha dl}{4 \pi e_0 (R^2 + l^2)}$$

para proceder a la integración demos cambiar de variables; entonces reemplazamos:

$$dl = - \frac{R \cdot d\alpha}{(\text{sen } \alpha)^2}$$

y también:

$$R^2 + l^2 = \frac{R^2}{(\text{sen } \alpha)^2}$$

Reemplazando estos valores:

$$|d\vec{E}_n| = - \frac{\lambda \text{ sen } \alpha \, d\alpha}{4 \pi \epsilon_0 R}$$

$$|\vec{E}_n| = - \frac{\lambda}{4 \pi \epsilon_0 R} \int_{\pi/2}^0 \text{sen } \alpha \, d\alpha$$

$$|\vec{E}_n| = \frac{\lambda}{4 \pi \epsilon_0 R}$$

luego:

$$\vec{E}_{nt} = 2\vec{E}_n = \frac{\lambda}{2 \pi \epsilon_0 R} \quad \text{V} \quad (\text{v/m}) \quad (25)$$

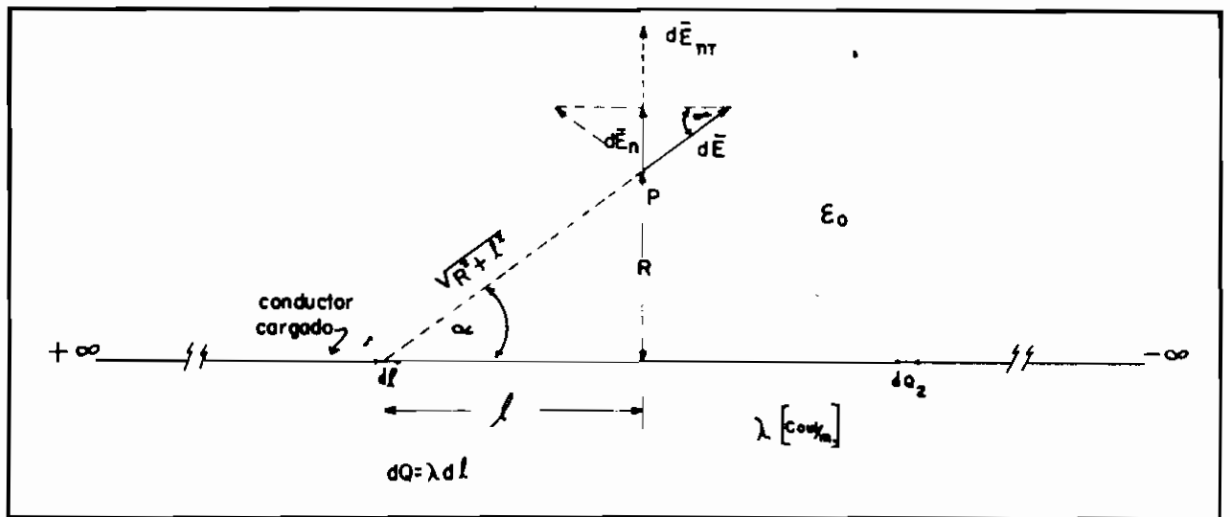


Fig. II-8

Campo eléctrico entre dos placas paralelas conductoras:

En la práctica, uno de los casos más comunes es el de dos placas en paralelo ya que esta disposición se la usa para condensadores y voltímetros electrostáticos. No es del caso presentar aquí una deducción completa de las ecuaciones que definen los valores de intensidad de campo, fuerza y potencial, sino más bien exponerlos con el objeto de utilizarlos más adelante en los casos prácticos de estudios experimentales y de laboratorio.

Dos placas paralelas conductoras, aisladas, tienen la propiedad de crear en el espacio intermedio (aire o cualquier dieléctrico) un campo homogéneo en todos los puntos a excepción de los extremos en que se presenta cierta dispersión.

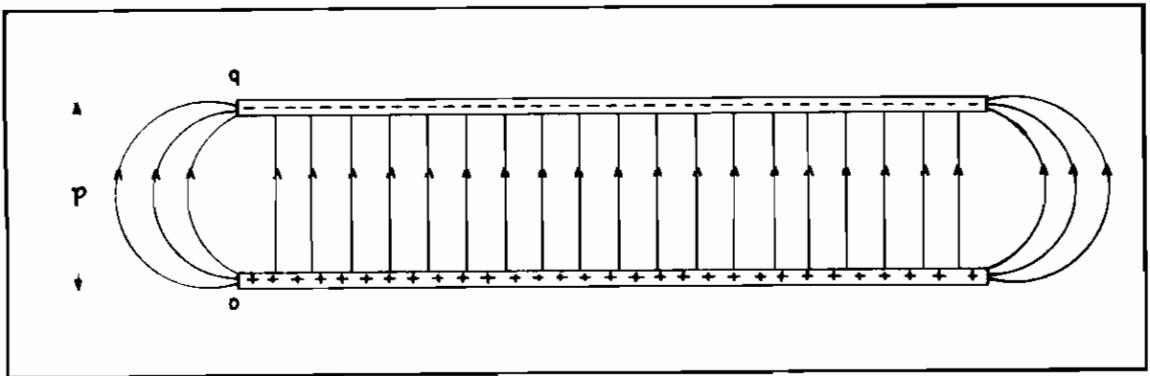


Fig. II-9

La componente del campo debida a la una placa es:

$$E_1 = \frac{\sigma}{2 \epsilon_0}$$

que es igual a la producida por la placa negativa. Den-

tro del espacio intermedio se suman las dos y la resultante es:

$$E = \frac{\sigma}{e_0}$$

siendo " σ " la carga específica superficial en Coulombios por metro cuadrado; en este caso es exactamente igual a la densidad de flujo eléctrico, ya que $D = e_0 E = \sigma$.

Como la intensidad de campo está en voltios por metro, tendremos que el potencial entre las placas será:

$$\Phi_{ab} = E \cdot d = \frac{\sigma}{e_0} d$$

Estudio de la capacitancia en varios elementos.

Capacitancia y elastancia:

La capacitancia "C" de un elemento se define como la relación entre carga " Q " y voltaje "V" aplicados a ese elemento condensador.

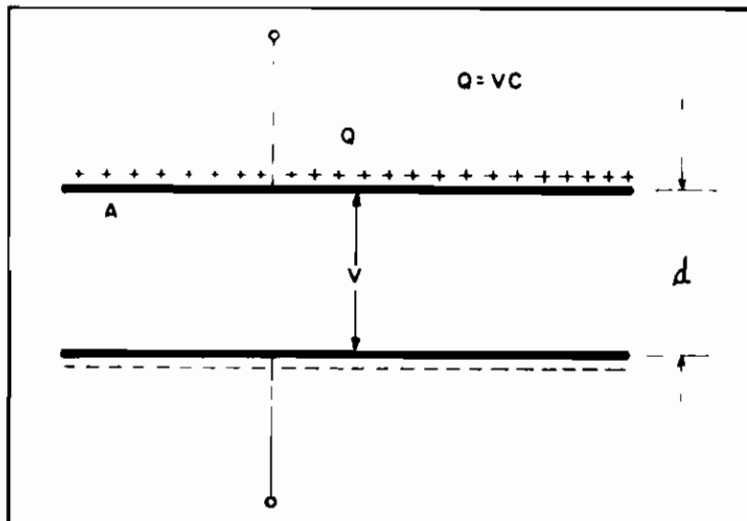


Fig.II-10

La capacitancia para fines prácticos se la mide en μF (micro-faradios) o pF (pico-faradios).

Para cálculos prácticos en los campos eléctricos utilizamos también el término elastancia "S" que es el inverso de la capacitancia. La elastancia de un conductor dieléctrico depende de la longitud, de la sección transversal y del material; corresponde a la resistencia de un conductor eléctrico y a la reluctancia de un material magnético.

Para una densidad de flujo uniforme a través de un área "A" (m^2) y una longitud del dieléctrico "d", la elastancia entre las dos superficies es: (fig. II-10).

$$S = \frac{d}{e_0 A} \quad (\text{darafs})$$

Es necesario señalar que todos los elementos que intervienen en una instalación eléctrica tienen su capacitancia ya sea con las otras piezas o con tierra. Esto influye notablemente sobre todo cuando se trata de Altas Tensiones, ya que al reducir las distancias por razones constructivas, prácticas, económicas, etc., se aumenta la capacitancia de estos elementos.

Conexión de condensadores:

El objeto de este estudio no es solamente para acoplar capacitancias unas con otras y formar circuitos, sino principalmente para analizar aisladores, cables, líneas, etc., que se pueden representar con circuitos equivalentes de condensadores en serie, paralelo o mixtos.

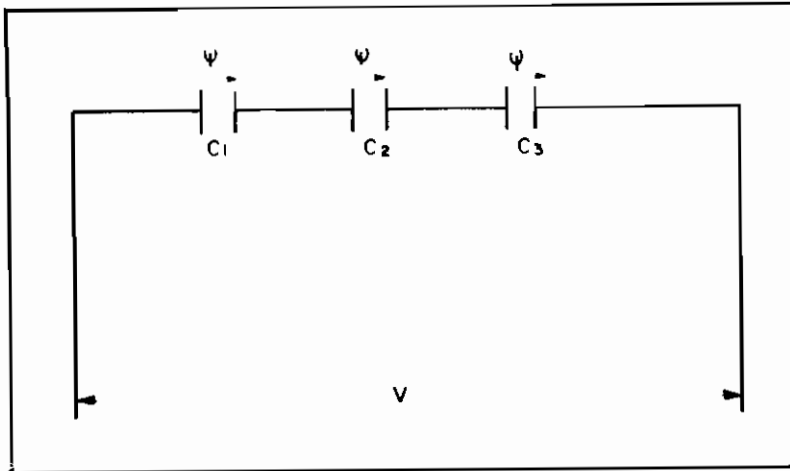


Fig.II-11_a

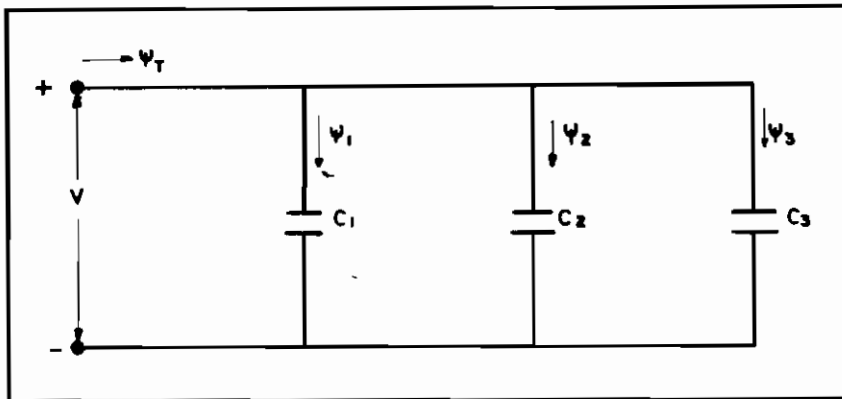


Fig.II-11_b

Acoplamiento de condensadores en serie:

Los tres condensadores de la figura II-11a, están en serie con un voltaje "V" aplicado a la combinación. Las respectivas capacitancias son C₁, C₂, C₃.

Si los condensadores estuvieran descargados inicialmente, la aplicación del voltaje establece el mismo flujo dieléctrico "ψ" en cada uno. Como el voltaje a través de cada condensador es igual al producto del flujo dieléctrico y la "elastancia", los respectivos voltajes V₁, V₂, V₃, son:

$$V = \psi S_1 \ ; \ V_2 = \psi S_2 \ ; \ V_3 = \psi S_3.$$

como $V = V_1 + V_2 + V_3$; luego:

$$V = \psi S_1 + \psi S_2 + \psi S_3$$

de donde $V/\psi = S_1 + S_2 + S_3$; pero V/ψ es la elasticidad equivalente del sistema y es el inverso de la capacitancia equivalente:

$$\frac{1}{C_e} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} + \dots$$

Podemos observar de esta relación que cuando los condensadores están en serie, el voltaje total se divide en forma inversamente proporcional a la capacitancia de cada uno.

Acoplamiento de condensadores en paralelo:

Haciendo el mismo análisis que para los condensadores en serie, pero considerando que esta vez es el flujo dieléctrico " ψ " el que se divide en cada condensador, podemos decir que:

$$C_e = C_1 + C_2 + C_3 + \dots$$

O sea que cuando varios condensadores están en paralelo, la capacitancia equivalente es igual a la suma de las capacitancias individuales.

Materiales aislantes y propiedades dieléctricas.

1.- Clasificación y propiedades generales:

La diferencia que existe entre materiales conductores y no conductores (aislantes), es la existencia de elementos libres que pueden transportar la electricidad de un punto a otro; en los metales hay muchos electrones "libres" y en algunas soluciones líquidas hay gran cantidad de iones móviles los que por su propiedad de llevar cargas eléctricas les dan la característica de buenos conductores. En otras clases de materiales, las fuerzas de acoplamiento en los electrones de valencia son tan grandes que evitan su intercambio y la conducción de la electricidad es un fenómeno que está prácticamente ausente; sólo tensiones muy elevadas causan la descarga. Como además no existe una "línea" divisoria entre estas dos clases de materiales es muy difícil clasificarlos exactamente, dependiendo su posición, en algunos casos, de la función específica que desempeña en la práctica.

Si nuestra atención se dirige al arreglo interno de las cargas, (que resulta de la aplicación de campos eléctricos), los materiales no conductores se llaman "dieléctricos". En cambio si estos materiales no conductores ~~son~~ usados, en aplicaciones prácticas, para confinar cargas estáticas o para obligar la conducción de corriente según predeterminados recorridos en la gran variedad y multiplicidad de circuitos eléctricos (evitando así la dispersión), hablamos de "aisladores".

2.- Ruptura del dieléctrico, (rigidez), y fuerza dieléctrica:

El punto en el cual el material deja de ser esencialmente un "no-conductor" y permite una apreciable conducción de corriente o se perfora físicamente,

es de suma importancia en la ingeniería.

Hay muchos factores que entran en la predicción de la intensidad de campo a la cual ocurre la ruptura. Una de las consideraciones más importantes es la presencia de impurezas o sea el grado de refinamiento del material bajo ensayo. La presencia de muy pequeñas cantidades de agua, por ejemplo, reduce considerablemente la rigidez dieléctrica del aceite de transformador. Además ciertas discontinuidades como esquinas afiladas o rugosidades superficiales pueden causar una falla del aislamiento, no precisamente por la intensidad del campo en ese punto, sino que por su gran concentración provoca un bombardeo de la superficie del aislante con grandes cantidades de gas ionizado alterándose la estructura física y química del aislante.

Los distintos materiales tienen distintas resistencias dieléctricas (rigidez dieléctrica), que son muy diferentes de su resistencia de aislamiento; por ejemplo el aire tiene una resistividad " ρ " mayor que la de muchos materiales aislantes líquidos o sólidos en cambio su rigidez dieléctrica es menor que la de casi todos. En un cable de transmisión de 220 kV. el papel impregnado en aceite debe tener solamente unos 6.5 cm. de espesor, mientras que en una línea aérea operando al mismo voltaje, el espaciamento requerido es de unos 6 metros o más. Se observa aquí la importancia de encontrar aislantes con gradientes de ruptura muy altas ya que es necesario, por razones económicas, limitar al máximo el espacio sin detrimento de las propiedades eléctricas y mecánicas. Es importante además que tengan suficiente estabilidad con respecto al tiempo (duración) y a la temperatura.

Hay que tener en cuenta que no existe una proporcionalidad entre la rigidez, la tensión y el espe-

sor del aislante; por ejemplo si un centímetro de aire descarga con 20 kV., 10 centímetros del mismo aire descargan antes de los 200 kV.

3.- Dieléctricos en serie en los campos uniformes.

En la construcción de condensadores, cables y otros dispositivos con aislamiento, es frecuente tener una disposición de dieléctricos en serie como se indica en la figura II-12, con el objeto de aislar mejor las partes metálicas. Además en la práctica es inevitable a veces, la presencia de delgadas películas de aire que se introducen entre los aislantes y que para determinar sus efectos se los considera como dieléctricos en serie.

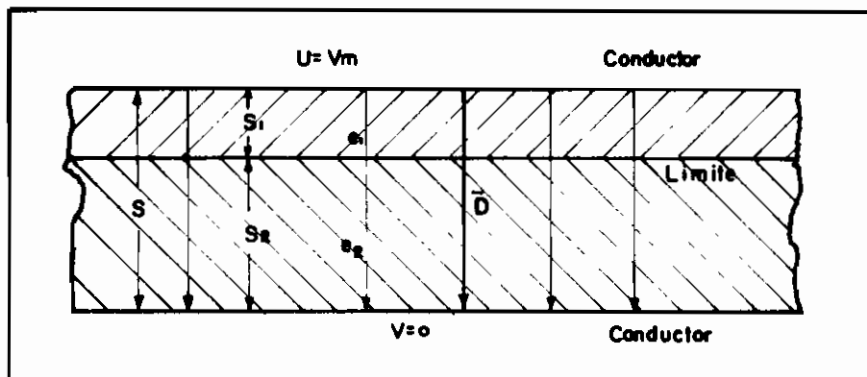


Fig.II-12

Según la figura, podemos asumir una densidad de flujo normal y continua en los dos dieléctricos, así sacamos las siguientes relaciones:

$$\vec{D}_1 = \vec{D}_2 \quad (a)$$

$$e_1 E_1 = e_2 E_2 \quad (b)$$

para relacionar esto con la diferencia de potencial aplicada V_m ,

$$V_m = \int \vec{E} \cdot d\vec{s} = E_1 S_1 + E_2 S_2 \quad (c)$$

resolviendo las ecuaciones (a) y (c) tenemos:

$$E_1 = \frac{V_m}{S_1 + (\epsilon_1/\epsilon_2) S_2} \quad (d)$$

y

$$E_2 = \frac{V_m}{S_2 + (\epsilon_2/\epsilon_1) S_1} \quad (e)$$

Llamando V_1 y V_2 a los potenciales a través de cada capa de dieléctrico, obtenemos:

$$V_1 = E_1 S_1 = \frac{V_m}{1 + (\epsilon_1/\epsilon_2)(S_2/S_1)} \quad (f)$$

$$V_2 = E_2 S_2 = \frac{V_m}{1 + (\epsilon_2/\epsilon_1)(S_1/S_2)} \quad (g)$$

Si nosotros tenemos, (como ocurre generalmente), una distribución uniforme de carga " σ " Coul/m². podemos decir que $D = \sigma$ entonces la capacidad por unidad de área será según las ecuaciones (f) y (g):

$$\frac{C}{A} = \frac{1}{(S_1/\epsilon_1) + (S_2/\epsilon_1)}$$

Cuando uno de los materiales es una película de aire (inclusión accidental) y el otro es cualquier dieléctrico, el valor límite de E cuando S_1 tiende a cero y S_2 , tiende a S , se obtiene^{de} las ecuaciones (d) y (e):

$$E_1 = \frac{\epsilon_2 V_m}{\epsilon_1 S} \quad \text{en el aire.}$$

y

$$E_2 = \frac{V_m}{S} \quad \text{en el dieléctrico.}$$

Aún cuando la caída de potencial es casi en

su totalidad a través del dieléctrico, la intensidad de campo en el aire es mayor que en el aislante por la relación (ϵ_2/ϵ_1), entonces la ruptura empezará en el aire; es por esto que hay que tener la precaución de que no entre aire en los dieléctricos utilizando aceites o barnices aislantes.

4.- El aire como aislante:

El aire se encuentra prácticamente rodeando a todos los implementos y dispositivos que conducen corriente eléctrica. En las líneas aéreas, por ejemplo, es prácticamente el único aislante; los aisladores de porcelana o vidrio lo que hacen es mantener a los conductores a una distancia entre sí o tierra tal que el aislamiento proporcionado por el aire sea el suficiente y no se produzca una descarga a través de él.

El aire es un material que en la práctica no es del todo homogéneo y que se halla afectado por una serie de condiciones tales como presión, humedad, temperatura, polvo, etc., que tienen que ser considerados al hacer un estudio de sus propiedades dieléctricas.

Como vemos, es prácticamente imposible determinar en forma exacta cuál va a ser su "resistencia dieléctrica" o cuál es la intensidad de campo eléctrico que, provocado por una tensión interelectródica, produciría la perforación. Los conocimientos que se tienen actualmente son puramente experimentales y se basan en pruebas en líneas o en laboratorios especializados de alta tensión.

Ionización:

El proceso con el cual se inicia la perforación del aire, (que es una mezcla de gases), es la ionización; es decir que debido a una muy alta intensidad del campo se produce la ruptura de las moléculas gaseo-

sas, por colisión con los electrones en movimiento, y los respectivos iones se orientan según la dirección del campo. Una vez que se ha producido esto, se establece la continuidad eléctrica, en mayor o menor grado según la ionización, y salta un arco de corriente entre los electrodos.

Sin embargo en la mayor parte de los casos no se llega a producir una ionización total entre los electrodos (conductores o tierra) sino únicamente en una capa alrededor del conductor. Esto se llama efecto "corona" y su estudio es de particular importancia ya que produce pérdidas de energía, potencia y afecta a los sistemas de comunicaciones con ruido e interferencia.

Efecto Corona:

La fuerza contra la ruptura del dieléctrico, y el carácter del fenómeno, dependen principalmente de la naturaleza de la configuración del campo.

En los campos uniformes, la ruptura es originada con el paso de una chispa. En campos no-uniformes la ruptura se hace evidente muchas veces antes de que salte la chispa por alteraciones (incluso visibles), alrededor del electrodo conductor.

Cuando la diferencia de potencial entre los conductores se incrementa hasta que la ionización es posible en la superficie de los alambres, se hace visible una cubierta de color violeta alrededor del conductor a la cual se le da el nombre de "corona". El aire está ionizado cerca del conductor, pero más lejos es todavía buen aislante.

La intensidad de campo crítica a la cual empieza la corona, depende de la rugosidad del conductor, de la presión atmosférica y densidad del aire; del ra-

dio del conductor y de la humedad del aire. Una relación empírica que sirve para voltajes alternos de bajas frecuencias en cables paralelos, está dada por la fórmula de F.W. Peek Jr.

$$E_c = 3 \cdot 10^6 m \cdot \delta \left(1 + \frac{0,301}{\sqrt{\delta R_c}} \right) \quad (\text{V/m})$$

en donde:

E_c = Intensidad de campo crítica, voltios por metro.

m = factor de rugosidad $0.8 \leq m \leq 1.0$

δ = densidad relativa del aire.

R_c = radio del conductor en centímetros.

Factor "m":

Se llama factor de forma del conductor y su valor es menor o igual que la unidad. Los valores experimentales vienen dados en la siguiente tabla:

m	Superficie conductora
1.0	Superficie pulida.
0,93 a 0,98	Conductor cilíndrico, rugoso y envejecido.
0,80 a 0,87	Conductor cableado.

Muchas veces el estado de la superficie varía con el uso del conductor. En regiones industriales se llega a cubrir con una capa de hollín y polvo que altera un poco el valor de m. Además la gradiente dieléctrica se excede en los empalmes, conexiones, ángulos agudos, etc., que pueda haber en la línea.

Factor de densidad del aire: También de acuerdo a los resultados experimentales,

se observa que el voltaje disruptivo crítico, (el valor de la tensión a que empieza a manifestarse el efecto corona), y que corresponde a una intensidad de campo también crítica, depende de un coeficiente llamado de densidad del aire " δ ". Esta corresponde a la relación de la densidad a una temperatura y presión dadas con respecto a la que se tiene a 25°C y a 760 Torr. Generalmente se amplía introduciendo el efecto de la humedad, en cuyo caso se llama "densidad absoluta del aire".

El valor de " δ " se determina de la fórmula de Peek y Petersen:

$$\delta = \frac{17,9 \text{ b (plg.de Hg)}}{459 + t(^{\circ}\text{F})}$$

en donde "b" es la altura barométrica y "t" es la temperatura.

5.- Aceites aislantes:

Entre los materiales aislantes más utilizados en la técnica se encuentran los aceites minerales de distintos tipos. Son derivados de la destilación del petróleo y tienen una rigidez dieléctrica comprendida entre 10.000 y 20.000 kV.m, lo que les hace muy útiles para el aislamiento de bobinas de transformadores, contactos de interruptores, etc.

Actualmente no existe un conocimiento muy profundo en cuanto al proceso de perforación con elevados campos eléctricos; se cree sin embargo, que puede deberse ya sea a la disociación de las moléculas del aceite, o a la gasificación del material en las cercanías de los electrodos, lo que haría que el proceso sea en principio similar al de cualquier gas como se vio anteriormente con el aire.

Cabe anotar que la pureza del aceite influye notablemente. El punto de perforación disminuye rápida-

mente para una pequeña cantidad de impurezas. La humedad sobre todo, (presente en forma de gotas finísimas de agua), hace que un aceite de muy buenas cualidades aislantes se vuelva completamente inservible. Es necesario, por esto, (como se verá más adelante), hacer pruebas constantes de su rigidez para poderlo utilizar en las mejores condiciones. Por ejemplo el aceite de transformadores debe regenerarse cuando su rigidez dieléctrica es menor que 80 kV/cm. El aceite nuevo debe tener por lo menos unos 125 kV/cm.

6.- Aislantes sólidos:

Los materiales aislantes sólidos desempeñan el mismo papel que los líquidos o los gaseosos. Sus aplicaciones principales están en los sitios en que se requiere a más de un efecto dieléctrico una función de soporte o de separación.

Hay lugares en que no se puede usar aislantes líquidos o gaseosos, por ejemplo en las máquinas rotativas, entonces se hace imprescindible aplicar materiales que no se vean afectados por el movimiento de las distintas partes o por la circulación del aire de enfriamiento..

Los aislantes sólidos se los usa ya sea como recubrimiento de los conductores: esmaltes, cauchos, termo-plásticos, etc., o como dispositivos de sujeción: aisladores de porcelana, vidrio, etc. Hablando en términos muy generales se los puede clasificar de la siguiente manera:

a) Materiales orgánicos:

En este grupo encontramos materiales que se usan tanto para recubrimiento como para soporte de los conductores, y podríamos citar: materiales textiles de seda, algodón y fibras sintéticas; derivados de la ce-

lulosa como papeles, algunos tipos de plásticos, cartones, esmaltes, etc.; productos sintéticos y naturales como el caucho, diversas resinas, neopreno, cloruro de polivinilo (PVC), polietileno y muchos otros. En los últimos años, la tecnología química ha hecho muchos adelantos en la fabricación de estos materiales, y se los utiliza actualmente ya sea para máquinas de todos los tipos como para cables y conductores aislados, con una gama de voltajes de operación que varía desde pocos voltios, en aplicaciones domésticas, hasta 200 y 400 kV en tramos de líneas de transmisión.

b) Materiales inorgánicos:

En este tipo de materiales hay muy poca variedad, pero no por esto son menos utilizados. Los más importantes son: la porcelana, el vidrio, la mica y el amianto. Los dos primeros se los usa especialmente como soportes ya sea para los hilos en las líneas de transmisión, como para los terminales de los transformadores, interruptores, etc., en toda clase de voltajes. Tienen una rigidez dieléctrica muy elevada de tal manera que antes de que se produzca ninguna perforación del material ya ha habido el contorneo, (*flash over*), a través del aire que lo rodea. Con estas materias primas se hacen aisladores de todas formas como: planchas, tubos, campanas, discos, pasamuros, etc., que se aplican en innumerables casos.

La mica y el amianto tienen aplicaciones más reducidas. Se limitan a bajos voltajes y principalmente en las máquinas rotativas (separación de delgas en los colectores), instrumentos de medición o equipos de laboratorio.

7.- Pérdidas en los dieléctricos:

Solamente están libres de pérdidas, (técnicamente), los condensadores de aire o de gas. En todos los

casos en que los dieléctricos son sólidos o líquidos aparecen pérdidas medibles que proceden de la resistencia "no infinitamente grande" del dieléctrico y de las corrientes internas de desplazamiento. Además pueden presentarse cargas residuales fijadas en el dieléctrico que solamente se compensan al cabo de largo tiempo o mediante sucesivas descargas.

Para dispositivos puramente aislantes que no desempeñan el papel de condensadores, también es muy importante el conocer las pérdidas ya que de este modo podemos determinar el rendimiento de un material u otro en una instalación.

Factor de pérdida y ángulo de pérdida:

Las citadas pérdidas hacen que la diferencia de fase " φ " no sea exactamente de 90° . La diferencia: $90^\circ - \varphi = \delta$, se denomina ángulo de pérdidas, y " $\text{tg } \delta$ " es el factor de pérdida. Depende de la naturaleza del dieléctrico, de la tensión, de la frecuencia y de la temperatura.

Un condensador no exento de pérdidas, puede imaginarse reemplazado por otro libre de ellas " C_0 ", (con $\text{tg } \delta = 0$), y una resistencia puramente óhmica " R_k " en la que se producirán las mismas pérdidas que se producen realmente en el condensador.

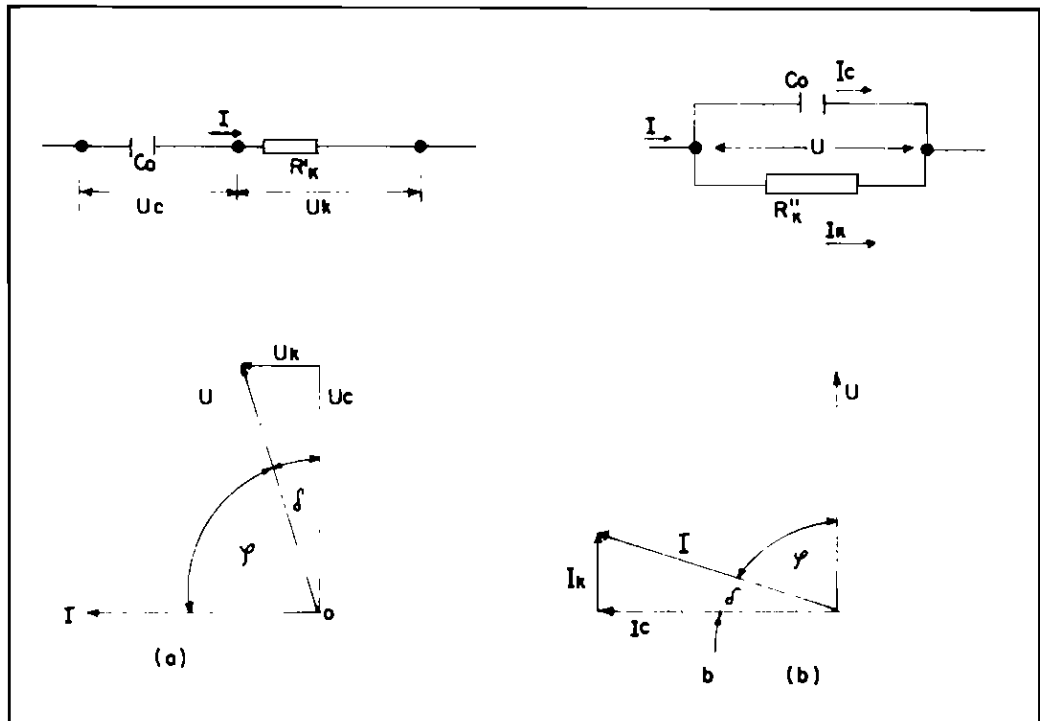
En el diagrama equivalente, (fig. II-13), C_0 y R_k pueden estar en serie o en paralelo. Para la conexión en serie tendríamos:

$$\text{tg } \delta = \frac{U_R}{U_C} = \frac{I \cdot R_k}{I / \omega C_0} = R_k \cdot \omega \cdot C_0$$

y para la unión en paralelo serán

$$\text{tg } \delta = \frac{I_R}{I_C} = \frac{U / R_k}{U \cdot \omega \cdot C_0} = \frac{1}{R_k \cdot \omega \cdot C_0}$$

Por lo tanto el ángulo de pérdida en los materiales aislantes y condensadores depende de la frecuencia. Los valores de R_k' y R_k'' son diferentes.



CAPITULO III

Ensayos en Alta Tensión:

Introducción.

El empleo de altas tensiones en el campo de la ingeniería eléctrica, pone a los técnicos que se ocupan de generadores, transformadores, interruptores, reductores de medida, descargadores, líneas de transporte, cables, aisladores, condensadores, etc., problemas cada día más importantes y difíciles.

La preparación puramente teórica no es suficiente; es indispensable la práctica, ya que la técnica de la alta tensión se encuentra todavía en el estadio experimental. Los fenómenos de descarga son demasiado complejos y no muy bien conocidos; en realidad lo que decide la bondad, la calidad, y las propiedades para establecer la tensión de ejercicio de cualquier aislante, es hoy día la prueba o ensayo directo.

Solamente recién se ha empezado a introducir laboratorios de alta tensión en las escuelas de ingeniería, con la ventaja de que los estudiantes se familiarizan con el equipo de alta tensión y además se pueden hacer ensayos industriales de equipos.

Obviamente, para ensayos directos sobre equipos y maquinaria de gran potencia, donde se requieren tensiones de prueba de hasta millones de voltios, no es la escuela ni tampoco la industria privada la que puede permitirse la instalación de un equipo extremadamente costoso; inclusive en los países más ricos y desarrollados se centralizan estos super-laboratorios a disposición de todas las industrias eléctricas para ensayos e investigación.

Las altas tensiones de interés para las ins-

tensiones de energía eléctrica son esencialmente las siguientes:

- a) tensiones alternas con la frecuencia de la red.
- b) tensiones continuas.
- c) tensiones de choque o impulso.

En los laboratorios se trata de reproducir, lo más fielmente posible, la misma situación de la realidad; sólo así se pueden conseguir y representar los verdaderos esfuerzos y sollicitaciones del equipo en ejercicio. Por esto se justifica la necesidad de engendrar altas tensiones alternas de forma sinusoidal, (a la frecuencia de la red); de tensiones continuas sin ondulación, y de tensiones de choque con las requeridas pendientes y otros requisitos según normas establecidas.

Ensayos con alta tensión alterna:

Al ingeniero eléctrico le interesan las frecuencias industriales, es decir, en general 50 o 60 hertzios. La medida de la tensión alterna adquiere fundamental importancia para cualquier tipo y forma de alta tensión, ya que todas se producen empezando por el transformador que aprovecha de la ley de la inducción electromagnética. (Más adelante se verá que cualquier montaje de ensayo, inclusive los de alta tensión continua y de choque, se inicia con el transformador elevador).

Para los problemas de aislamiento es generalmente determinante el valor máximo o de cresta de la tensión alterna. Cuando la forma de onda no es sinusoidal, no es válida la relación:

$$\text{valor máximo} = \text{valor eficaz} \cdot \sqrt{2}$$

Se han desarrollado varios métodos para la determinación del valor máximo o de cresta, empleando toda una variedad de equipo: esferas espinterométricas, divisores de tensión, voltímetros electrónicos, etc.

A.- Medición de la tensión:

Un primer ensayo consiste en la medición de altas tensiones alternas, con el objeto de evaluar los resultados de los diferentes métodos.

El esquema de montaje es fundamentalmente el siguiente:

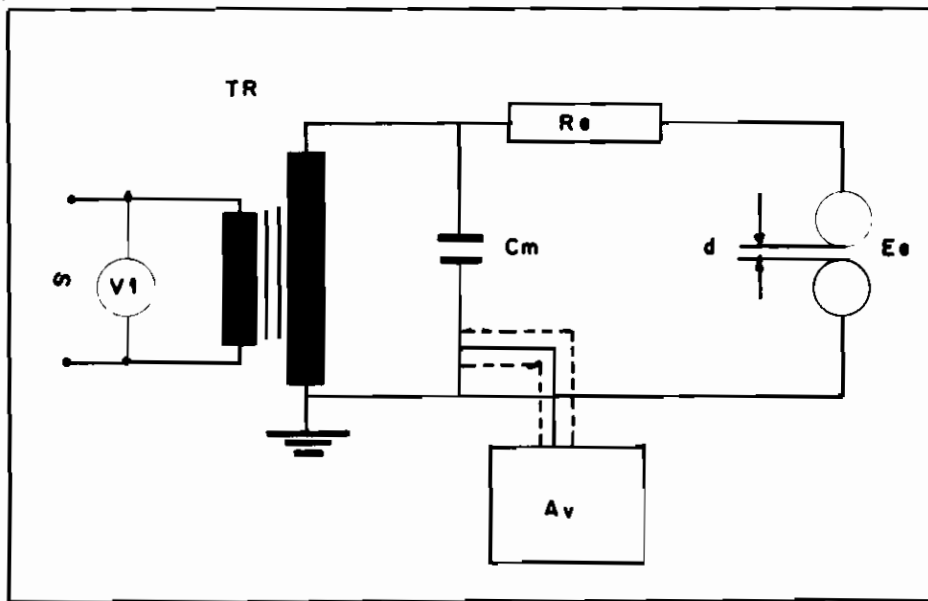


Fig.III-1

T_r : Transformador elevador.

E_e : Esferas espinterométricas.

C_m : Condensador de medida.

R_1 : Resistencia limitadora.

A_v : Aparato de medida para la tensión de cresta.

V_1 : Voltímetro para valor eficaz.

Por ejemplo en referencia a la figura III-1, para una distancia explosiva "d" en milímetros, de las esferas, se determina la tensión de tres maneras diferentes como se puede ver en el siguiente cuadro:

No.	Valor eficaz	Método y aparatos	
1.	$V_1 \cdot r_t$	mediante medida.	Lectura del instrumento en el lado de baja tensión, multiplicada por la relación de transformación.
2.	$\hat{V}_2 / \sqrt{2}$	Mediante tablas.	considerando la distancia explosiva de las esferas.
3.	$\hat{V}_2 / \sqrt{2}$	mediante medida.	divisor de tensión capacitivo, con aparato de medida para el valor de cresta.

El signo " ^ " indica el valor de cresta.

En la evaluación de los métodos mencionados se observa que:

- a) La validez de la fórmula 1. es aceptable sólo en vacío, condición que no introduce variaciones de tensión.
- b) La tensión deducida de las tablas, en función del diámetro y distancia de las esferas, tiene que ser corregida si la densidad del aire, (función de la presión y la temperatura), no corresponde al valor de las normas: 760 Torr y -20°C ; además el valor expresado en las fórmulas 2. y 3. es válido sólo para la forma sinusoidal de la onda.
- c) El valor medido con el divisor de tensión capacitivo, no obstante la presencia de capacidades parásitas, da resultados más exactos y además permite con-

tinuidad de medidas directas, sin necesidad de corrección para los distintos valores de densidad del aire.

En medidas con esferas es necesario hacer por lo menos cinco descargas y tomar la media aritmética con el objeto de tener valores más exactos.

Método Chubb-Fortescue.:

Mediante la corriente alterna que circula por un condensador patrón se puede determinar el valor eficaz de la tensión:

$$i_c = \frac{dq}{dt} = C \cdot \frac{dv}{dt} \quad (\text{valor instantáneo})$$

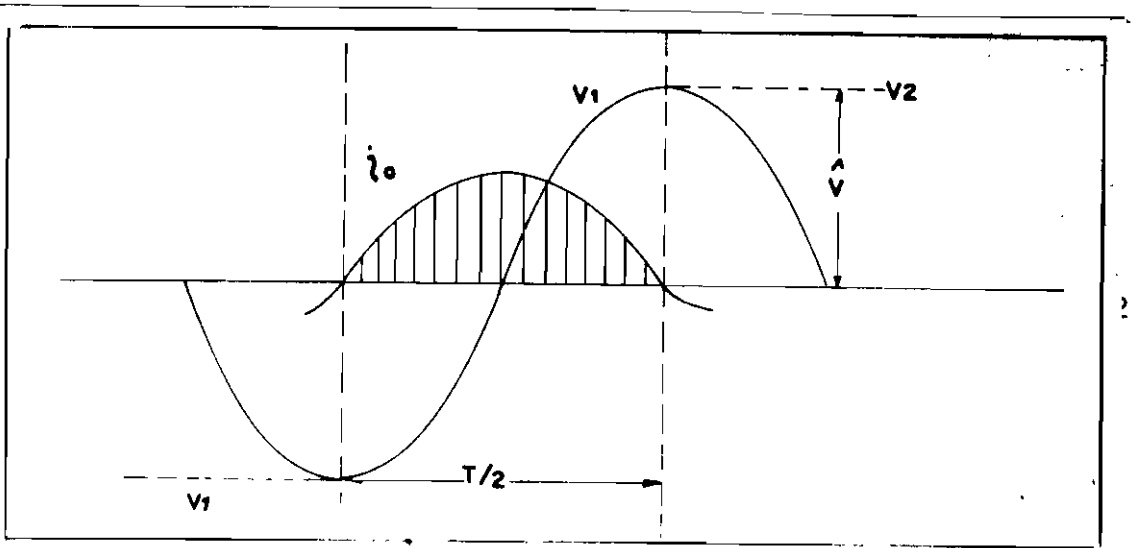
$$I = + j \cdot \omega C \cdot V. \quad (\text{valor eficaz para ondas sinusoidales})$$

luego, conocida la capacidad "C" y la velocidad angular " ω " se calcula el valor eficaz de la corriente alterna.

$$V = \frac{I}{j \cdot \omega C}$$

Para determinar el valor de cresta, se intercala en el circuito un rectificador de semionda; el valor medio de la tensión resulta:

$$I_m = \frac{1}{T} \int_0^{T/2} i_c \cdot dt = \frac{C}{T} \int_{V_1}^{V_2} dv = 2 \cdot f.c. \hat{V}$$



De esta manera se puede medir directamente el valor de cresta de la tensión, sin errores debidos a la deformación de la onda, ya que en la ecuación interviene el valor medio de la corriente y valores constantes como la frecuencia y la capacitancia.

La medida de las pérdidas en los materiales aislantes:

Como se ha explicado en el capítulo II, es costumbre definir las pérdidas en los aislantes mediante el parámetro $\text{tg } \delta$ (tangente del ángulo de pérdidas). En la técnica de la Alta Tensión, la medida de la tangente del ángulo de pérdidas se hace mediante el puente de Schering, que se muestra en forma esquemática en la figura:

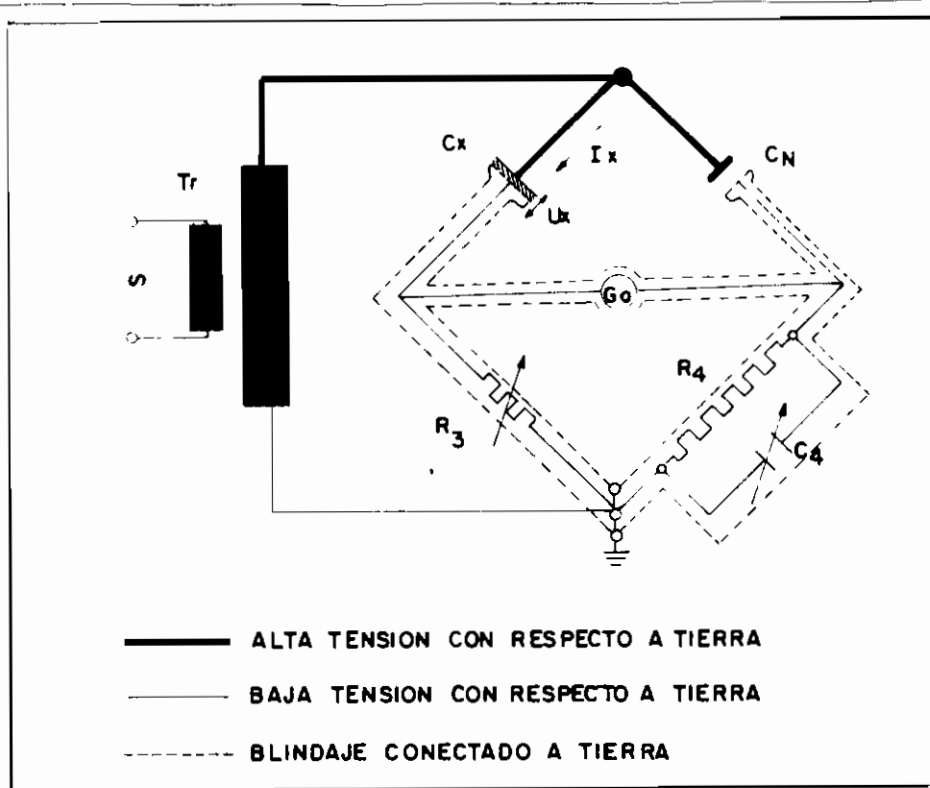


Fig.III-3.

En la figura esquemática del puente de Schering, consideramos las siguientes partes:

T_r : Transformador elevador.

C_x : Condensador o muestra bajo prueba.

C_N : Condensador libre de pérdidas para alta tensión.

C_4 : Condensador variable para baja tensión.

R_3 y R_4 : Resistencias óhmicas no inductivas.

G_0 : Valvanómetro de cero.

La capacitancia del objeto bajo prueba, y su tangente δ , quedan definidos con los valores de R_3 y C_4 , que son variables a voluntad en el puente. Cuando

hay equilibrio en el puente, resulta válida la siguiente relación:

$$\frac{Z_x}{Z_N} = \frac{Z_3}{Z_4} \quad (1)$$

El condensador C_x representa una impedancia compleja debido a las pérdidas (fig. II-13).

$$Z_x = R_x + \frac{1}{j \cdot \omega \cdot C_x} \quad (2)$$

y las otras impedancias se definen como sigue:

$$Z_3 = R_3 \quad (3)$$

$$Z_N = \frac{1}{j \cdot \omega \cdot C_N} \quad (4)$$

$$\frac{1}{Z_4} = \frac{1}{R_4} + j \cdot \omega \cdot C_4 \quad (5)$$

substituyendo en la relación (1)

$$\left(R_x + \frac{1}{j \cdot \omega \cdot C_x} \right) j \cdot \omega \cdot C_N = R_3 \left(\frac{1}{R_4} + j \cdot \omega \cdot C_4 \right) \quad (6)$$

si igualamos las partes reales y las imaginarias tenemos:

$$C_x = C_N \frac{R_4}{R_3} \quad (7)$$

$$R_x = R_3 \frac{C_4}{C_N} \quad (8)$$

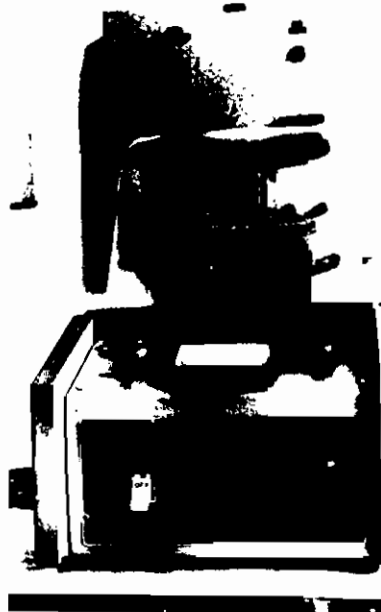
Según el diagrama vectorial, (fig. II-13); $\text{tg } \delta$ sería igual a $R_x \cdot \omega \cdot C_x$, pero reemplazando C_x y R_x por (7) y (8), tenemos:

$$\text{tg } \delta = R_4 \cdot \omega \cdot C_4$$

B.- Medida de la rigidez dieléctrica de los aceites aislantes:

En la industria eléctrica, se emplean enormes cantidades de aceites aislantes, sobre todo en los transformadores de potencia. Las cubas de los grandes transformadores trifásicos y monofásicos pueden contener algunas toneladas de aceite, que tiene la doble función de refrigerante y aislante.

El control de las propiedades aislantes del aceite tiene que ser hecha por lo menos cada seis meses de operación, ya que podría ser deteriorado por oxidación, humedad, carbonización o por la presencia de impurezas. En la práctica lo que se hace es determinar la rigidez dieléctrica. Se utiliza un aparato especial llamado probador de aceite, que consiste básica-



F.III-1

mente en un transformador elevador y un recipiente, con dos electrodos, en el que se coloca el aceite a probar. (F.III.1), probador de aceite del laboratorio de Alta Tensión de la Escuela Politécnica Nacional de Quito). Estos electrodos son dos esferas, o discos

de tamaño, forma y separación establecida en las normas respectivas. Estas normas son diferentes según el país y sería deseable una unificación para facilitar el proceso de ensayo.

Después de haberlo limpiado cuidadosamente para eliminar cualquier película de polvo; se llena el recipiente con el aceite que tiene que ser controlado. Una vez lleno, se dejará en reposo por unos minutos para permitir la evacuación de posibles burbujas de aire, antes de aplicar la tensión. Esta deberá elevarse gradualmente con el tiempo, (en razón de 1 kV. a 3 kV por segundo, según normas), hasta obtener la descarga. También son variables, según el país o el sistema de normalización, el número de descargas por cada muestra de aceite y el número de muestras. Por ejemplo las normas americanas prevén para el valor de la rigidez dieléctrica, el promedio de la tensión de ruptura de 15 pruebas, 95 rupturas con cada muestra).

En resumen, los factores variables según las distintas normas nacionales, son los siguientes:

1. Forma de los electrodos.
2. Distancia de los electrodos.
3. Número de muestras a ensayar.
4. La manera de subir con el voltaje.
5. La duración de la prueba.
6. La capacidad del transformador de prueba (VA).
7. La determinación del voltaje de ruptura.
8. Aceite en movimiento o en reposo durante la prueba.

Más o menos para las normas de todos los países se requiere que los aceites para transformadores y disyuntores resistan a gradientes entre 80 y 100 kV/cm. a 20°C de temperatura y 760 Torr de presión.

En caso de resultados negativos, se repetirá

el ensayo después de regenerado el aceite mediante prensas-filtros con lo que se elimina las impurezas y la humedad.

Ensayos de aislamiento sobre materiales sólidos:

Generalidades.

A veces el objeto de estos ensayos es simplemente establecer si el equipo resiste a determinados niveles de tensión, para la garantía de adecuados coeficientes de seguridad.

$$\text{índice de seguridad} = \frac{\text{Tensión de prueba}}{\text{Tensión nominal}}$$

mientras otras veces se trata de determinar la "rigidez dieléctrica" que se define como el valor del campo eléctrico por arriba del cual el material aislante pierde sus propiedades dieléctricas, es decir, sufre la perforación.

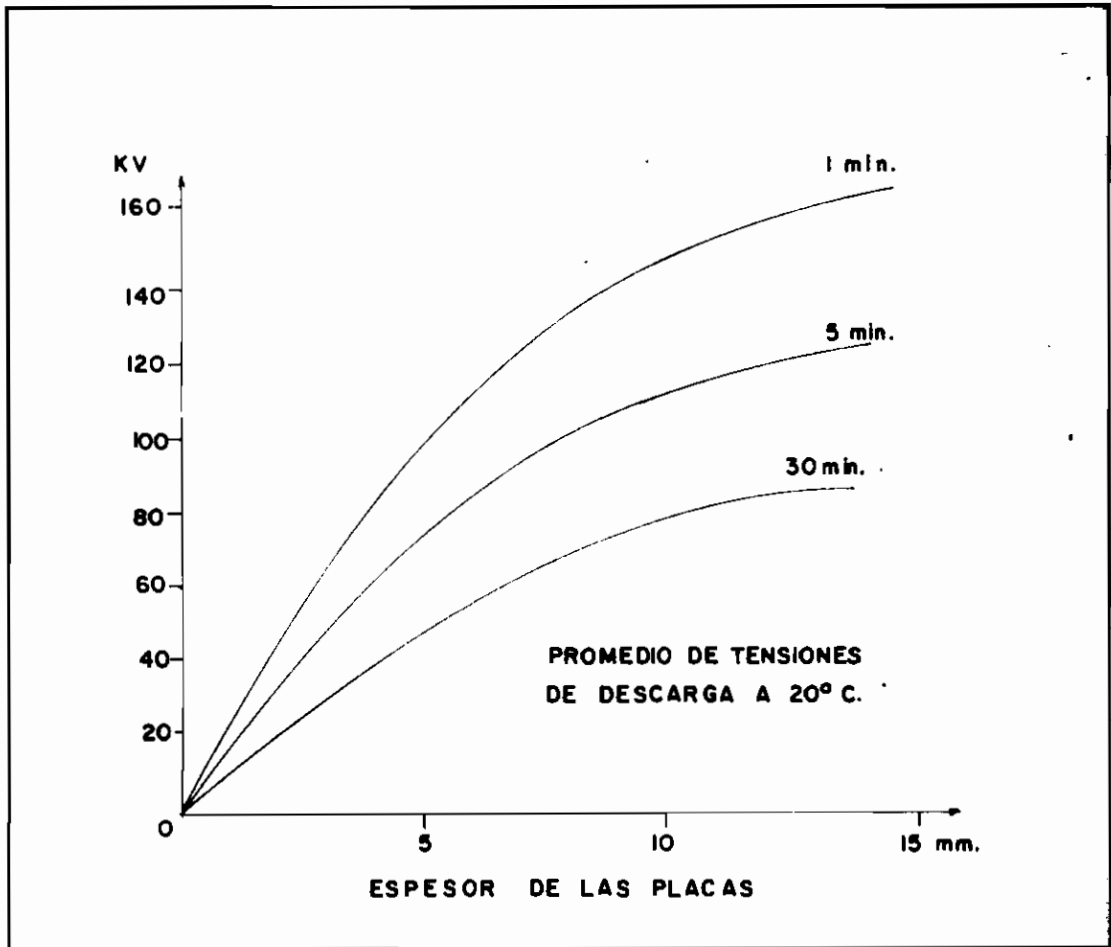
La tensión de perforación del material aislante es una función muy compleja de un gran número de variables: naturaleza del material, temperatura, presión, humedad, dimensiones geométricas, grado de homogeneidad, forma de la tensión alterna, tiempo, espesor, etc.

Por ejemplo, cómo se explica la influencia del espesor sobre el valor de la rigidez dieléctrica?.

Como resulta de una gran cantidad de ensayos, la curva de perforación, tensión/espesor, no es una recta; es decir, el valor kV/cm no resulta constante, sino que disminuye al aumentar el espesor. La razón de esta variación es que la rigidez dieléctrica disminuye con el aumento de temperatura; solicitando al aislante con tensión alterna, hay pérdidas por histéresis dieléctrica que calientan al material: la temperatura resultará tanto mayor cuanto mayor es el espesor, porque no varía la superficie de evacuación del calor, mientras au-

menta el volumen y por consiguiente las pérdidas.

Por ejemplo si una muestra de espesor "S", llega a soportar una tensión V, entonces posee una rigidez dieléctrica V.S, una muestra del mismo material de espesor 2S, resiste una tensión inferior a 2V, luego tiene una rigidez inferior a la primera muestra.



Por la misma razón la rigidez dieléctrica depende también del tiempo de duración de aplicación de la tensión como se puede ver en los gráficos de arriba. (Fig.III-4).

Esta influencia del tiempo es tanto mayor cuanto mayor es el espesor ya que de esto depende el

tiempo para llegar al régimen térmico.(la temperatura final).

Con tensiones alternas, la rigidez dieléctrica depende también de la forma de onda. Se podría pensar que la rigidez depende solamente del valor máximo de la tensión; en realidad, este valor tiene gran importancia, porque determina la máxima sollicitación eléctrica en el aislante; sin embargo no se debe creer que dos tensiones de igual valor máximo pero de formas diferentes, tengan idénticos efectos; las pérdidas son diferentes en los dos casos, por tanto también las temperaturas dependiendo de las armónicas contenidas en las ondas especificadas.

Los ensayos con tensión alterna se hacen sobre toda clase de muestras y equipos. Cuando se trata simplemente de componentes aislantes o de instrumentos pequeños, es en general, suficiente una tensión de ensayo entre 10 y 50 kV.,(como las muestras, p.ej. de papel, mica, porcelana vidrio, goma, bakelita, etc., se pueden reducir fácilmente en espesor y tamaño); mientras que para pruebas sobre construcciones completas,(alternadores, transformadores, descargadores, interruptores, etc.), se requieren tensiones de ensayo entre 300 y 2.000 kV o más en casos excepcionales.

Razones económicas obligan a limitar la potencia de la fuente de alta tensión en las instalaciones de ensayo. No hay limitaciones o dificultades deudas al calentamiento, que casi no existe por la brevedad de los ensayos. Los kVA de la fuente de alta tensión dependen esencialmente de la corriente capacitiva del objeto bajo prueba que normalmente se trata de una carga reactiva; sólo en caso de elevadas pérdidas dieléctricas se añade una potencia activa.

A título de orientación, la capacidad "C" tie-

ne los siguientes valores según los distintos casos:

Aisladores	unos pF.
Pasamuros	100 a 250 pF.
Transformadores de protección y medida.....	200 a 400 pF.
Transformadores de potencia hasta 1000 KVA.....	500 a 1000 pF
Transformadores de potencia sobre 1000 KVA	1000 a 4000 pF.
Cables	200 a 300 pF/m.

La potencia nominal de un transformador de alta tensión para ensayos tiene que ser múltiplo de la potencia de carga, (capacitiva) del objeto que se quiere ensayar; entonces en tensión alterna:

$$P = 2. \pi .f.C.V^2.k \quad (\text{KVA})$$

donde $k \approx 5 \dots 10$

Por ejemplo con 100 kV y 500 pF. se requiere una potencia:

$$P = 7,5 \dots 15 \quad \text{KVA.}$$

Si la capacidad del objeto requiere una potencia mayor que la disponible, se puede emplear para los ensayos la tensión continua en lugar de la alterna, como frecuentemente ocurre en cables de transmisión grandes que tienen elevada capacidad.

Dividimos estos ensayos dentro de tres categorías:

- a) Sobre máquinas eléctricas. (alternadores, transformadores, motores).
- b) Sobre aparatos como disyuntores, descargadores, aisladores.
- c) Sobre muestras de materiales aislantes componentes de equipo eléctrico (vidrio, mica, poercelana, papel, etc.).

a) Ensayos sobre máquinas eléctricas:

Las normas establecen modalidades y prescripciones de las pruebas. Las pruebas son generalmente sólo de aislamiento en el sentido de averiguar si la máquina tiene coeficientes de seguridad suficientes. Pueden ser para fines comerciales (según términos de contrato entre cliente y fabricante) y para fines técnicos. Se ensayan sólo máquinas nuevas.

En paralelo con la máquina bajo prueba se ponen dos esferas espinterométricas (fig. III-1) que tienen una doble función: de medición y de protección (constituyendo un descargador contra falsas maniobras que podrían destruir la máquina).

Sin entrar en los detalles de las normas, vale la pena mencionar que las tensiones de prueba pueden ser externas o internas o en otras palabras, "aplicadas" o "inducidas", como por ejemplo, cuando se hacen las pruebas de aislamiento en los arrollamientos de los transformadores de potencia. Por ejemplo, en un transformador trifásico 10/220 kV, sucesivamente entre cada fase de la alta tensión y las otras conectadas entre sí y masa, se aplican "de afuera" unos 400 kV. para un minuto, según las normas alemanas e italianas. La misma tensión pero "inducida" se obtiene aplicando el primario con alrededor de unos 18 kV.

En máquinas sincrónicas y asincrónicas (alternadores y motores) las normas generalmente prevén pruebas de aislamiento entre fases, y entre fases y masa, con tensión externa de prueba por lo menos doble de la nominal; para las pruebas con tensión interna (inducidas) las normas alemanas e italianas prevén una tensión hasta 1,5 veces la nominal.

En los alternadores, para no aumentar demasiado la corriente de excitación, (evitando así la de-

formación de la onda debida a la saturación), se puede aumentar la velocidad de la máquina hasta un 25...30% de la nominal.

En los transformadores se puede también, aumentar la frecuencia de ensayo, limitadamente a las pérdidas que se pueden causar en el hierro.

Los ensayos tienen que hacerse en lo posible a la temperatura de funcionamiento de la máquina.

Se hacen pruebas de breve y larga duración, (1;5;15;30 minutos). La duración se calcula desde el momento en el cual la tensión ha subido hasta el valor previsto para la prueba. Para averiguar el aislamiento de convertidores de vapor de mercurio y otras máquinas especiales, se procede de igual manera; se hacen ensayos de breve y larga duración, con tensiones de prueba de algunas veces la tensión nominal según las distintas normas preparadas para el efecto.

b) Ensayos sobre equipos como disyuntores, descargadores, aisladores, rectificadores, capacitores, etc.

Pruebas de aislamiento sobre los disyuntores:

Para las pruebas a frecuencias industriales, las modalidades son parecidas a las aplicadas en las máquinas eléctricas; es decir rigen las mismas normas por cuanto se refiere a la forma de onda, la medida de la tensión, la manera de aplicar la tensión de prueba, y la potencia de la instalación de ensayo. Generalmente la duración es de un minuto, como para las pruebas de breve duración en las máquinas. Se hacen además pruebas en seco y bajo lluvia según se trate de equipo para uso interno o externo.

La lluvia artificial se consigue mediante una fuente separada, no conectada a la red pública de distribución, para evitar peligros durante las pruebas. La lluvia tiene que ser uniforme con una inclinación de 45°

y una intensidad de 3 mm. al minuto según ciertas normas. La temperatura del agua no debe diferir más de 10°C de la temperatura ambiente; su resistividad tiene que estar comprendida entre 9.000 y 11.000 ohms. cm., nunca inferior a 4.000 ohm.cm.; las normas dan factores de corrección para resistividades diferentes de 10.000 ohms.cm.

Las pruebas sobre disyuntores se hacen de acuerdo a las siguientes prescripciones:

a.- Con disyuntor abierto: entre los bornes de salida y entrada de una misma fase o polo; y entre los bornes y masa.

b.- Con disyuntor cerrado; entre polo y polo y entre bornes y masa.

Pruebas sobre los descargadores.(pararrayos):

La función fundamental de los descargadores e, como indica la misma palabra, descargar a tierra las ondas de choque debidas a los rayos evitando así daños o destrucción de costosa maquinaria. Obviamente, muchos más importantes y extensivas serán las pruebas bajo tensiones de impulso, descritas más adelante; sin embargo las normas prevén también para los descargadores, pruebas con tensiones alternas y continuas.

Los descargadores protegen las instalaciones eléctricas contra solicitaciones de valor muy elevado y de muy corta duración; tienen que poner a tierra, temporalmente, el conductor sujeto a la sobre tensión y establecer en seguida, una vez desviado el peligro, el aislamiento del mismo conductor. Para desempeñar esta función, están provistos de un dispositivo de "encendido" (espinterómetro) que queda abierto en condiciones de tensión normal, se cierra a tierra en los casos de sobretensión y se reabre al retorno de la tensión normal.

Las pruebas para determinar la tensión normal de encendido, son importantes para la coordinación del

aislamiento. Se hacen sobre el descargador completo con tensión continua o alterna según la destinación.

En la prueba con tensión alterna se aplica inicialmente el 75% del valor de la tensión de encendido, lo cual según las normas es el doble de la tensión nominal, luego se aumenta el voltaje hasta llegar a la descarga de encendido; en el circuito hay que intercalar un resistor para limitar la corriente de descarga a unos 20 mA. La prueba tiene que ser repetida unas cinco veces, con intervalos de tiempo de por lo menos 30 seg. Como valor de tensión de encendido se toma el promedio de los cinco valores medidos.

Pruebas sobre aisladores:

Se hacen ensayos en seco y en húmedo siguiendo las mismas modalidades de los disyuntores y descargadores.

Hay pruebas de "selección" o preliminares que se hacen durante la fabricación para eliminar las piezas defectuosas, y pruebas "técnicas" o definitivas.

Para aisladores por arriba de 1 kV. de tensión nominal se hacen pruebas de descarga superficial, (contorneo), y de descarga destructiva, (perforación). Existen tablas que indican la tensión de prueba en función de la tensión nominal desde un kilovoltio hasta 220 y 380 kV. de las grandes interconexiones modernas.

Para dar una idea, las normas alemanas VDE, fijan que con una tensión de servicio V, la mínima tensión de contorneo del aislador con tiempo lluvioso ha de alcanzar el siguiente valor:

$$V_p = 1,1 \cdot (2,2 V + 20) \quad (\text{kV})$$

todo expresado en kilovoltios.

También en estas pruebas se empieza aplicando una tensión reducida, cerca del valor mitad, aumentándolo uniformemente. Se repite la prueba varias veces; el

valor mínimo que ha provocado la descarga superficial se define como la tensión "crítica" del aislador.

Para los rectificadores, capacitores, etc., fundamentalmente se aplican los mismos procedimientos, habiendo pequeñas diferencias en los detalles según las funciones específicas, establecidas por las respectivas regulaciones.

c) Ensayos sobre muestras de materiales aislantes:(componentes de equipo eléctrico: vidrio, mica, porcelana, bakelita, papel, etc.):

Son siempre pruebas de rigidez dieléctrica, que se realizan aumentando la tensión hasta la perforación. El objeto principal es establecer tablas de propiedades para los distintos materiales. Las normas prevén una gran variedad de detalles para espesor de la muestra, forma de los electrodos, previsión sobre la muestra, tiempo, etc. Para limitar la potencia y el voltaje del equipo de ensayo se limita el tamaño de las muestras.

A veces para evitar el contorneo, se hace la prueba sumergiendo la muestra y los electrodos en aceite de transformadores. Los resultados se expresan en kilovoltios-centímetros.

Ensayos con alta tensión continua:

Generación y medición de altas tensiones continuas.- Las tensiones continuas que como veremos luego, tienen muy variadas aplicaciones en el campo de los ensayos de laboratorio, se generan rectificando tensiones alternas.

Para obtener la tensión directa, se utilizan rectificadores de material semi-conductor como selenio o silicio conectados en el secundario del transformador. Los rectificadores que se construyen actualmente son de muy alto rendimiento y su capacidad de conducción varía desde algunos miliamperios hasta 200 amperios o más.

Un esquema simple de la generación de tensión continua sería:

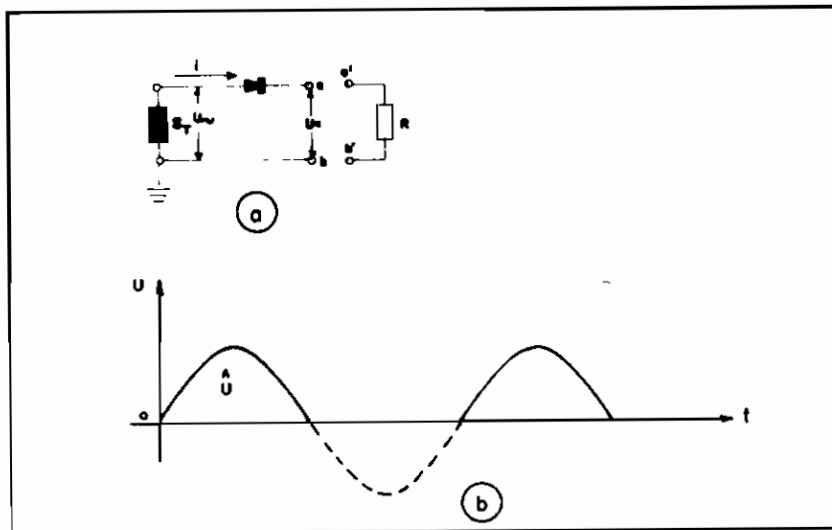


Fig.III-5

Este tipo de conexión si se la aplica a una carga R , va a tener una curva de respuesta como se indica en la misma figura (b), es decir la rectificación se ha realizado sólo en media onda.

Si además conectamos un condensador de sufi-

ciente capacidad y con una constante de tiempo adecuada entre los terminales a y b, podemos conseguir un aplanamiento de la onda rectificadora al efectuarse la descarga del condensador desde el valor máximo \hat{U} hasta el que se determina por el ciclo siguiente. Fig.III-6.

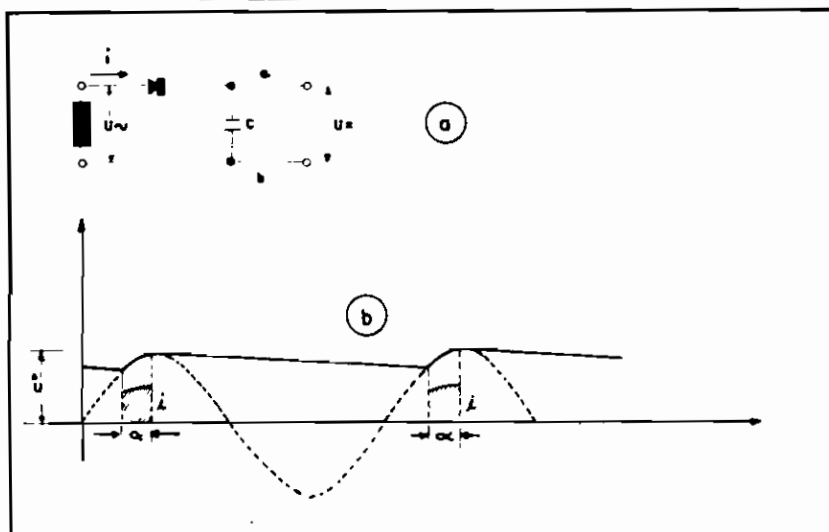


Fig.III-6

La corriente de carga "i" que circula por el rectificador permanece solamente por el tiempo " α " suficiente para cargar al condensador C desde su valor residual hasta el valor máximo \hat{U} .

La rectificación puede también hacerse mediante la conexión de Graetz o en puente, con lo cual se consigue que sea la onda completa la que se rectifica, es decir que cada semiciclo de tensión alterna tiene un solo sentido, por inversión. Así y con la ayuda de un condensador auxiliar se consigue una mayor uniformidad de tensión continua.

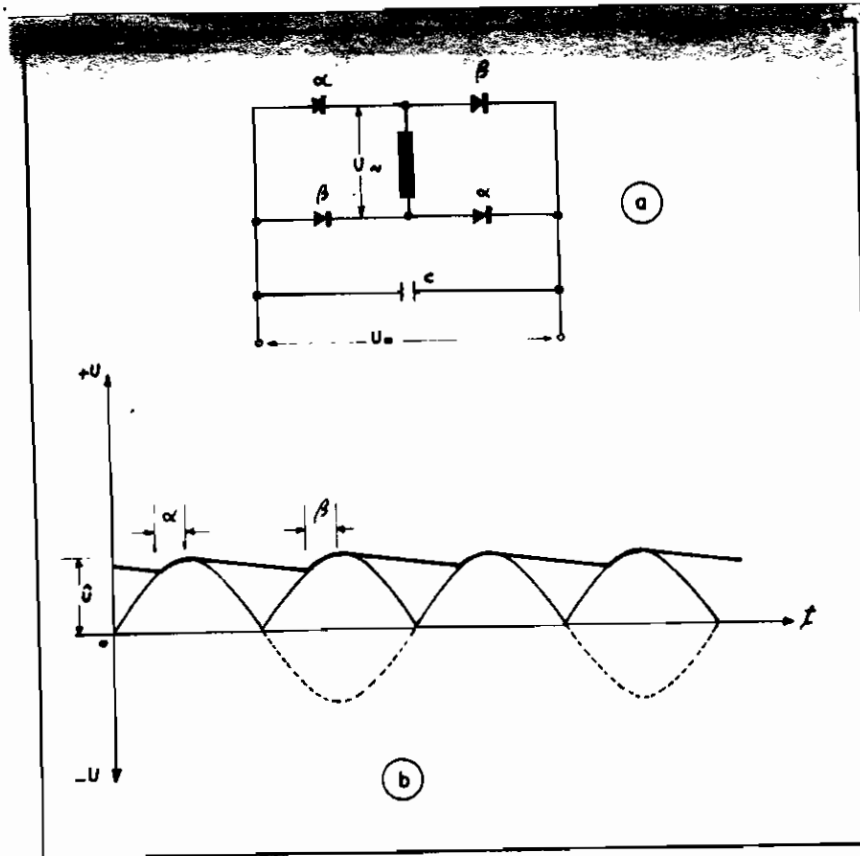


Fig.III-6

Con el objeto de obtener una tensión prácticamente doble se utiliza la conexión en cascada de Greinacher. Su funcionamiento se basa en que a un condensador, se le carga durante el primer semiciclo de voltaje y en el siguiente se lo descarga en serie con la tensión del transformador. El condensador C_1 se carga con la tensión total del transformador y el condensador C_2 se carga con la tensión $2\hat{U}_m$; el proceso se canaliza con dos rectificadores y el aplanamiento de la onda se realiza mediante un condensador que se descarga con una constante de tiempo elevada.

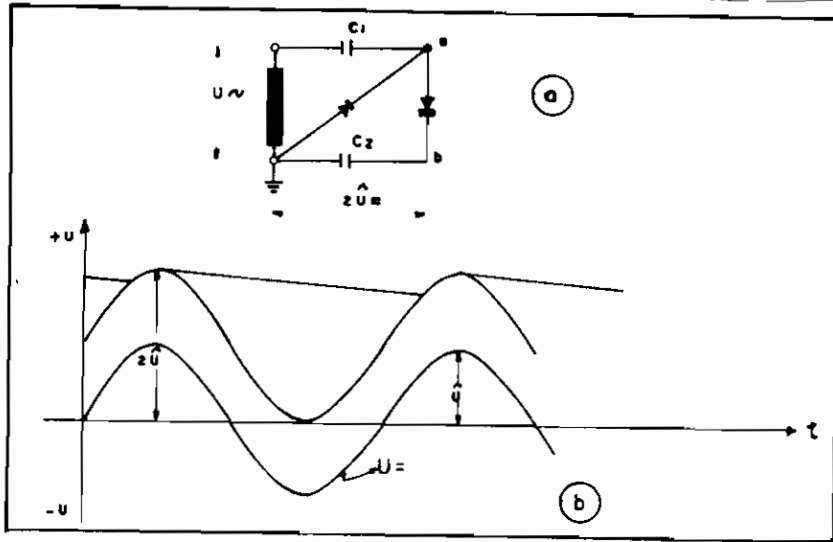
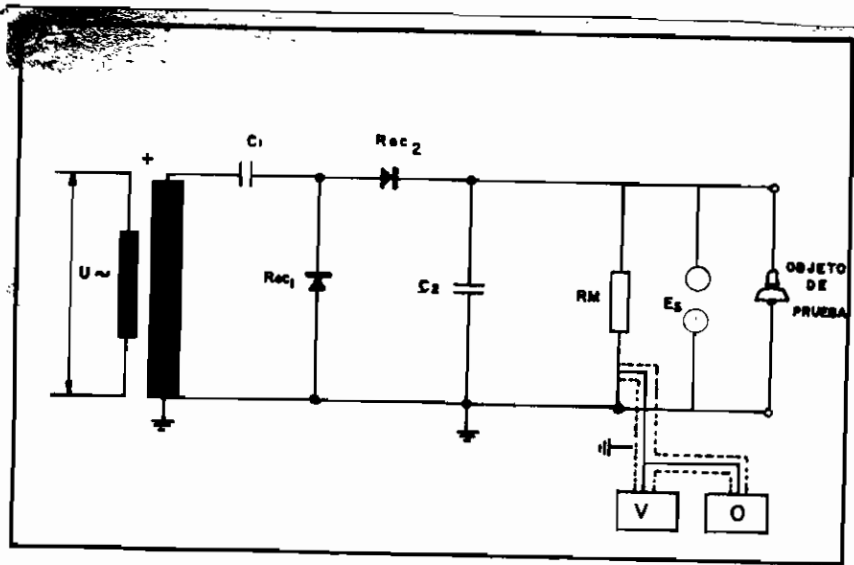


Fig.III-7

Considerando este método desde el punto de vista práctico del ensayo tendríamos una conexión como se puede ver en la figura siguiente, III-8, en la que:

- T : Transformador elevador.
- C_1 y C_2 : Condensadores de carga.
- Rec_1 y Rec_2 : Rectificadores de selenio de tensión de pico inversa muy elevada.(100 kV. o más).
- RM : Divisor de tensión resistivo para medición.
- E_s : Esferas espinterométricas.
- V : Voltímetro.
- O : Osciloscopio de rayos catódicos.



.III-8

Se consigue una multiplicación de la tensión con una disposición de los elementos rectificadores y condensadores en forma de cascada continua utilizando el mismo esquema fundamental de Greinacher.

El circuito a-a'-b', de la figura siguiente, rectifica la media onda de la tensión del transformador

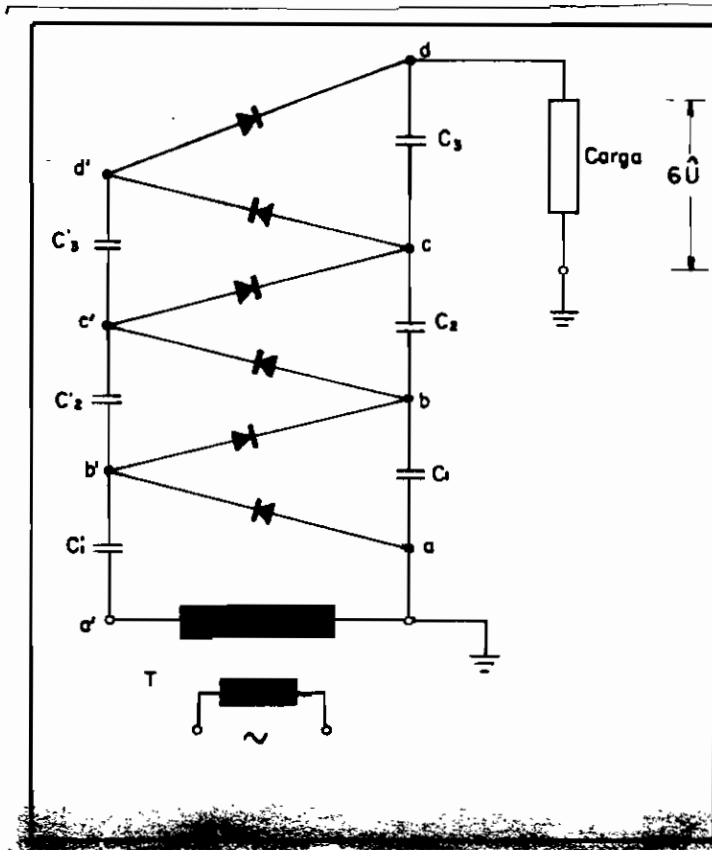


Fig.III-9

y carga al condensador C_1' con el voltaje máximo \hat{U} . El potencial del punto b' varía, por tanto, desde cero hasta $2\hat{U}$ y este potencial se aplica al circuito rectificador de media onda a-b'-b cargándose el condensador C_1 con una tensión equivalente a dos veces la tensión máxima ($2\hat{U}$); de modo semejante se cargan los demás condensadores con la misma tensión (excepto el C_1'), obteniéndose en el punto "d", un potencial con respecto a tierra de " $2.n.\hat{U}$ ", que en este caso es igual a $6\hat{U}$.

Los ensayos con tensiones continuas pueden a veces substituir satisfactoriamente ensayos con alta tensión alterna cuando se trata de objetos de prueba con capacitancias elegadas. Si el ensayo se hiciera con generadores de alta tensión alterna, se necesitaría una capacidad (KVA) muy elevada para suplir las corrientes capacitivas, lo que no sucede con la tensión continua.

Ensayos con Altas Tensiones de choque o impulso:

La generación de ondas de impulso o de choque en un laboratorio, tiene como objeto principal el reproducir lo más exactamente posible aquellas tensiones que por efectos atmosféricos, estarán en ciertos casos, aplicadas a los equipos y maquinaria utilizados en la técnica y en la industria. En otras palabras se trata de reproducir artificialmente los rayos en los laboratorios.

El rayo, una de las manifestaciones más importantes de la naturaleza y el enemigo más peligroso de los sistemas de transmisión aéreos, constituye un fenómeno de cada día. Se estima que sobre la superficie terrestre se descargan diariamente más de 40.000 tempestades eléctricas, con un promedio de alrededor de 100 rayos por segundo. Es interesante dar una idea

del orden de magnitud de la energía descargada por un rayo. La cantidad de electricidad de una descarga oscila entre 0.05 y 50 Coulombs. Mc Ecahron ha calculado para descargas de rayos "lentas" ($\sim 0,5$ seg.) e intensidad de corriente limitada (~ 1.000 amp.), cantidades de electricidad hasta 165 Coul.

Podemos así estimar la energía descargada. Por ejemplo con una tensión de 10^8 voltios, resulta una energía "W".

$$W = \frac{1}{2} V^2 \cdot C = \frac{1}{2} V \cdot CV = \frac{1}{2} QV = \frac{1}{2} 165 \cdot 10^8 \approx 10^{10} \text{ joule.}$$
$$= 2.500 \text{ kWh}$$

La intensidad de corriente oscila en general entre 3.000 y 200.000 amperios, y muy a menudo entre 20.000 y 60.000 amperios.

La mayoría de las descargas ocurren entre nube y nube, registrándose longitudes de rayos de hasta 40 km; menos numerosas son las descargas entre nube y tierra, con longitudes de hasta 1 km.

El rayo se forma cuando el campo eléctrico entre nubes cargadas supera los 30 kV/cm. Sigue una ionización por choque con la formación de canales de chispas entre nubes, y hacia tierra, con ramificaciones de descarga de la energía acumulada. Todo ocurre, generalmente en tiempos de microsegundos, y es un fenómeno que no presenta periodicidad.

Los rayos son, por tanto, ondas de tensión muy elevada que tienen una subida brusca seguida de un descenso menos rápido hasta cero. La curva de estas tensiones puede ser representada por una ecuación tensión/tiempo de este tipo:

$$U = A (e^{-mt} - e^{-nt})$$

Matemáticamente resulta la diferencia de dos ^{Exponenciales} ecuaciones ~~excepcionales~~. Con el objeto de tener una representación gráfica hagamos:

$$A = 1 \quad ; \quad m = 0,1 \quad ; \quad n = 2.$$

con lo que las curvas resultan según el siguiente gráfico:

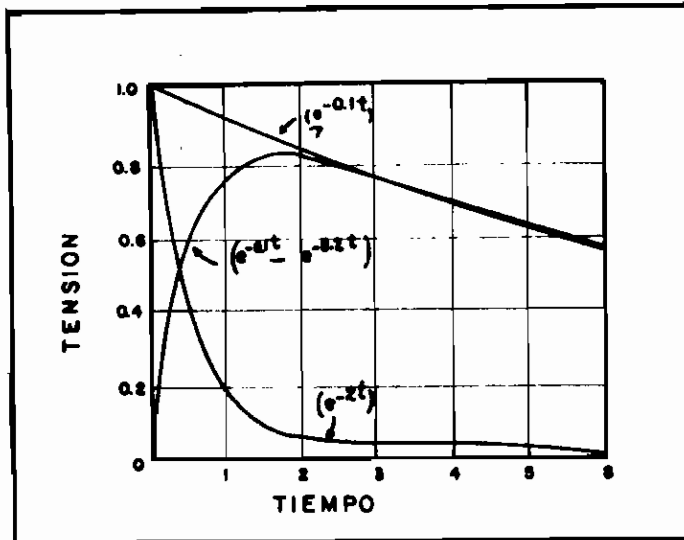


Fig. III-10

La reproducción de estas ondas permite conocer la distribución de potenciales en los arrollamientos de una máquina, diseñar aislamientos de mejor calidad; determinar la capacidad de una cierta máquina para resistir los enormes esfuerzos eléctricos; constatar la calidad de materiales y dispositivos aislantes, etc.; con la enorme ventaja de que se pueden manejar fácilmente y controlar sin mayor dificultad los valores característicos de estas ondas.

Con relación a las tensiones de impulso provocadas por las descargas atmosféricas, es necesario hacer un estudio rápido de sus características antes de hablar de la manera de producirlas.

Definiciones.

Formas básicas de las ondas de impulso.

Al estudiar las ondas de choque tenemos tres

formas básicas:

1.- Una representación teórico-imaginaria de lo que sería la peor condición posible; es decir se aplica un voltaje " E_1 " instantáneamente y éste se mantiene en el transcurso del tiempo (Fig. III-11 a).

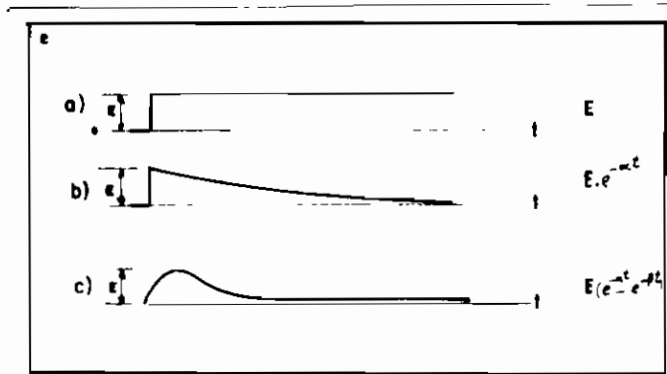


Fig. III-11

2.- La segunda posibilidad, es en el caso en que el frente de onda suba instantáneamente hasta el valor E y que luego descienda lentamente hasta cero, según la función:

$$E. e^{-\alpha t}$$

Corresponderá a la carga instantánea de un condensador y a la descarga a través de una resistencia. El parámetro " α " sería el factor de decrecimiento equivalente a $1/CR$.

3.- El caso real sería el correspondiente a la figura c, en que también el proceso de carga sería lento y la ecuación completa podría ser la diferencia de dos funciones exponenciales:

$$E. (e^{-\alpha t} - e^{-\beta t})$$

en que α y β dependen de los parámetros del circuito o de los valores standard para estas ondas de choque. Voltaje de impulso.

Como hemos visto, es un voltaje unidireccional que sin tener oscilaciones apreciables crece rápi-

damente hasta un valor máximo y luego disminuye más lentamente hasta el valor de cero. Esta onda se especifica, generalmente, para el valor máximo, aceptándose pequeñas oscilaciones que no pasen del 5% del valor de cresta. Para fines prácticos se tomaría una curva tiempo-voltaje media.

Si un voltaje de este tipo se desarrolla sin causar perforación o contorneo, se denomina "voltaje de impulso completo"; en caso contrario, se desarrollaría una caída de la onda y se llamaría "voltaje de impulso cortado".(chopped wave).

Frente de la onda.

Es la porción de la onda en que el voltaje crece hasta el valor máximo.

Cola de la onda.

Esta parte de la onda, se considera desde el valor máximo en adelante. (con respecto al tiempo).

Duración del frente de onda.

Es el tiempo empleado por el voltaje de impulso en subir desde cero hasta el valor máximo; este valor llamado " t_1 ",(para conveniencia de las medidas), se define como:"1,25 por el tiempo comprendido entre el 10% y el 90% de voltaje en el frente de la onda";se expresa en microsegundos.

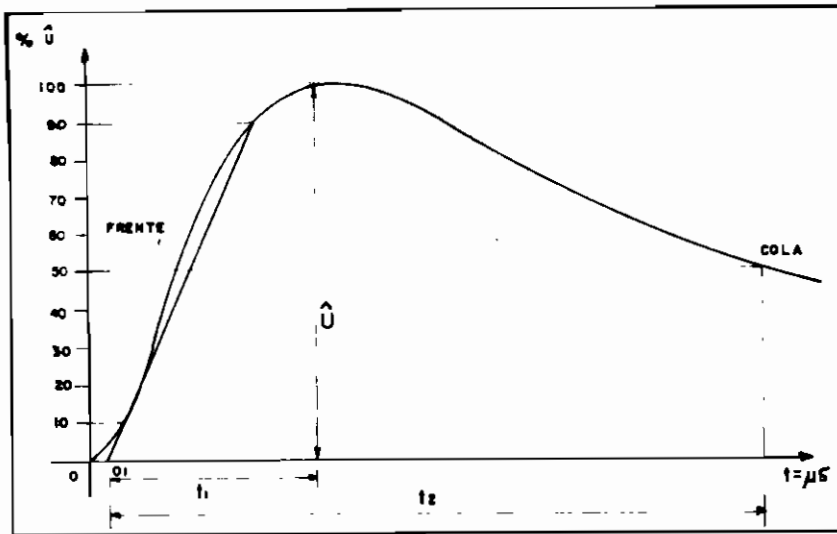


Fig.III-12

Tiempo de amplitud media.

Es el tiempo que transcurre para que el voltaje descienda desde el valor de cresta hasta un 50% de éste, sobre la cola de la onda. Se expresa también en micro segundos y se empieza a medir desde el origen nominal de la onda: "punto O_1 en la figura anterior).

Según las normas de IEC (International Electric Commission) las ondas se expresan y se definen con tres parámetros en la forma: $A, t_1/t_2$; en que A es el valor de cresta en kilovoltios; t_1 es el tiempo en llegar al valor máximo y t_2 el tiempo en llegar al valor de media amplitud.

Se consideran como normales las ondas de:
1,5/40; 1/10; y 0,5/5 μs en los Estados Unidos.
1/50; y 1,2/50 μs en Europa.

0-----0

Generación de ondas de impulso en escala reducida.

Con el objeto de visualizar la onda de choque en un osciloscopio normal aplicando directamente el potencial a las placas verticales, se pueden producir tensiones de choque de amplitud reducida. Estas ondas sirven principalmente para analizar la distribución del potencial en las distintas partes de un circuito a

escala.

Un ensayo muy interesante consiste en la construcción de un generador de impulsos de baja tensión y la observación de los resultados en un osciloscopio.

El circuito simple se halla formado por tres partes fundamentales: un condensador, una inductancia y una resistencia. El condensador se carga al aplicársele una tensión continua, y se descarga sobre la resistencia a través de la inductancia en serie. El diagrama del circuito se lo puede ver en el siguiente gráfico. El switch "S" es el que inicia, al cerrarse, el proceso de descarga del condensador "C".

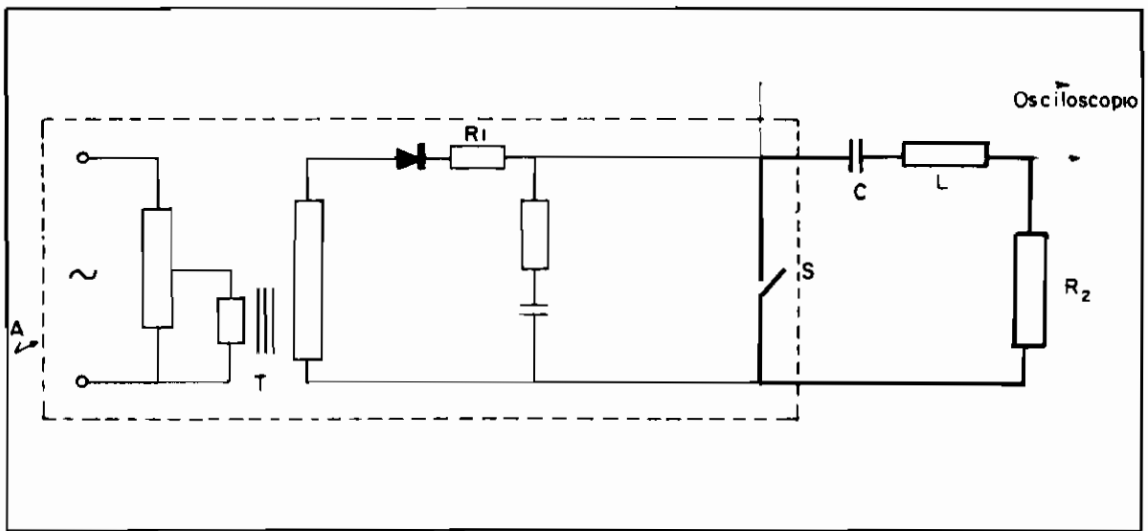
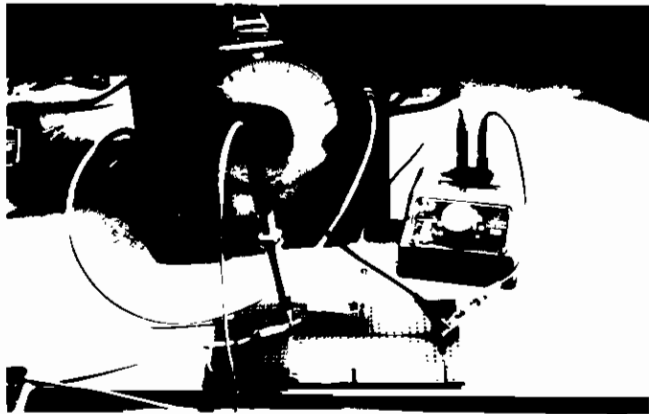


Fig.III-13

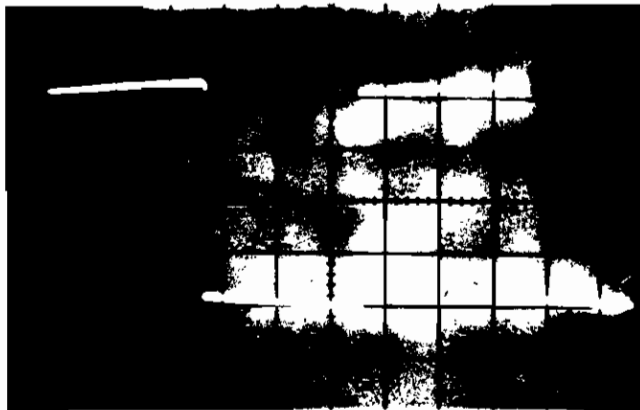
Este sistema hace que el proceso no sea repetitivo, por lo cual habría que cerrar y abrir el switch continuamente para obtener resultados más o menos satisfactorios. Con el objeto de obtener un proceso continuo y repetido, se ha reemplazado el sistema de alimentación "A", (bloque cerrado por la línea de puntos en la figura anterior), por un generador de onda cuadrada, fotografía siguiente, que simplemente nos entrega pulsos de tensión

a una frecuencia determinada.(fotografía III-2).



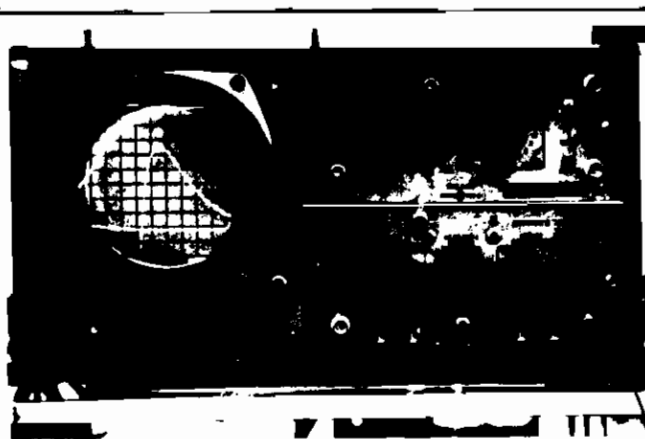
F.III-2

En esta fotografía, se muestra al generador experimental de impulsos conformado por un generador de onda cuadrada, un condensador electrolítico, una década de inductancias y una resistencia de carbón. Se observa además la salida hacia el osciloscopio.(ORC).



F-III-3

En esta fotografía se ve la forma de la onda de alimentación, generada en el oscilador de onda cuadrada.



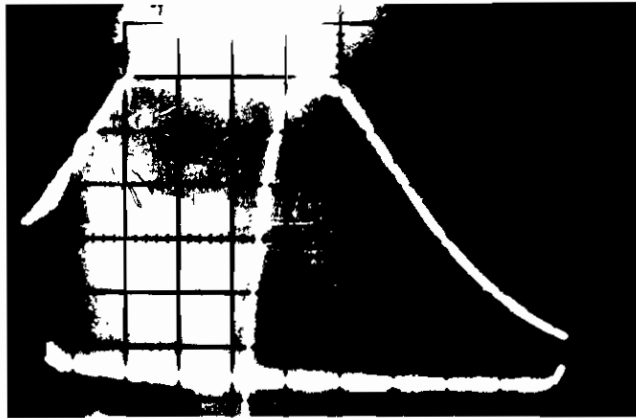
F-III-4

Vista del osciloscopio en que se hicieron las observaciones de este experimento.(Hewlett-Packard).



F.III-5

Esta fotografía y la siguiente nos muestra los resultados de este ensayo. Son dos oscilogramas tomados con distintos tiempos de barrido del osciloscopio y nos muestran la onda de choque producida en el generador experimental. Se puede observar la subida rápida del frente de la onda y como se produce el descenso más lento en la cola.



F.III-6

En estos oscilogramas podemos ver a más del impulso de tensión normal, centro de la pantalla, algunas líneas que rodean a la función principal; éstas son nada más que prolongaciones de otras ondas de impulso que aparecen debido a la frecuencia de la entrada y porque el proceso es repetitivo. Se las ve arriba y abajo porque la tensión de alimentación, a pesar de ser en forma de onda cuadrada es siempre alterna.

Si se quiere obtener una onda normalizada, es necesario determinar, mediante cálculo o experimentación, los valores críticos C , L y R . En este experimento se dan solamente valores de forma, es decir, los oscilogramas no son normalizados ni calibrados para una medición, ya que se ha tratado de obtener solamente la forma de la función.

Una vez obtenida esta tensión, aplicamos la salida del generador de choque a la máquina o aparato que deseamos probar. Tomando luego, medidas con el osciloscopio en distintos puntos del arrollamiento, o de las piezas sometidas a estos impulsos, podemos conocer cuál es la distribución del potencial de impulso y establecer, por comparación las diferentes tensiones internas. Un estudio experimental de este tipo permite

conocer los esfuerzos eléctricos a los que van a estar sometidos los aislantes.

Generación de Altas Tensiones de impulso.

Con el objeto de obtener tensiones de choque muy elevadas se utiliza la disposición ideada por Erwin Marx, (profesor del Instituto de Alta Tensión de Braunschweig), que en su forma inicial estaba formado como en el siguiente diagrama:

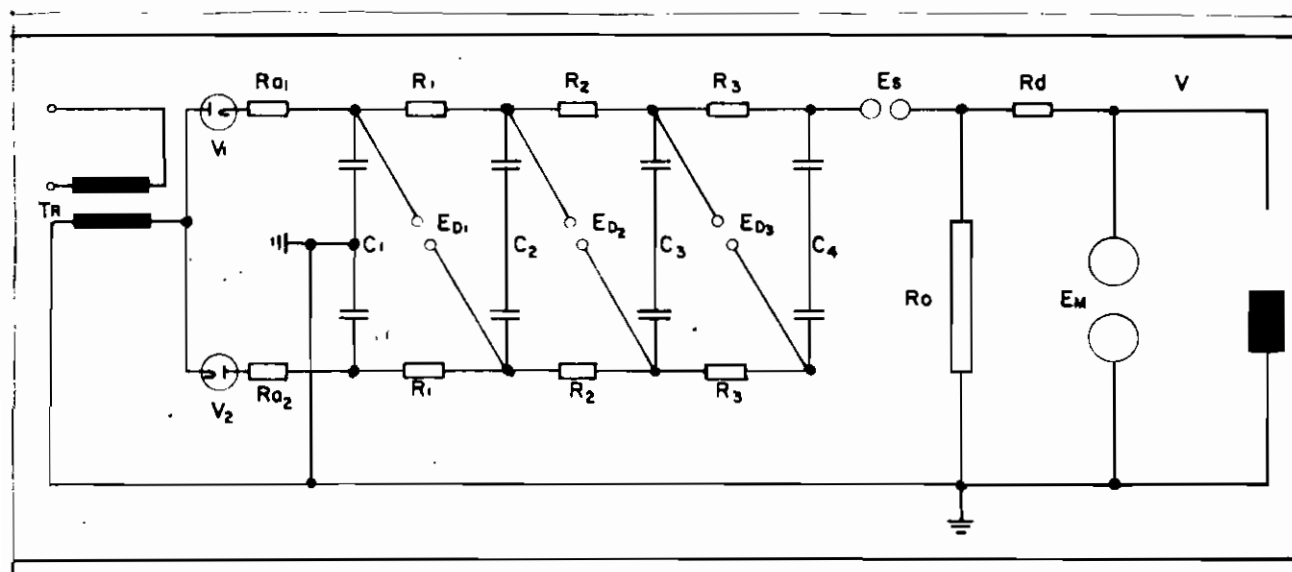


Fig. III-14

El principio básico de funcionamiento es como se ha expuesto antes en los generadores de choque a baja tensión.

Para facilitar el análisis y asimilar el esquema a un diagrama fundamental, utilicemos otra disposición equivalente, (fig. sig.) en que se tiene:

a) Un grupo de "n" condensadores de capacidad C_1 cargados en paralelo con la tensión U , a través de las resistencias R . (resistencias de valor muy elevado en comparación con R_1 ; R_2 ; R_3). Cuando los condensadores están cargados se acoplan en serie mediante los espacios de descarga: E_{D1} ; E_{D2} ;; $E_{Dn} = 1$; etc., y

se descargan a través de la resistencia de amortiguamiento R_a . Debido a la corta duración del fenómeno, los condensadores en serie serían equivalentes a un sólo de valor C_1/n .

b) Tres resistencias R_1 ; R_2 ; y R_3 cuyo valor está determinado de tal manera que para un valor dado de la capacidad de carga C_2 a los bornes del "objeto de ensayo", se obtenga una tensión de choque según las normas de ensayo: 1/50; 1,5/40; 1,2/50; 1/5 μ s.)

El valor de R_1 al que nos referimos es:

$$R_1 = R'_1 + n.R_a$$

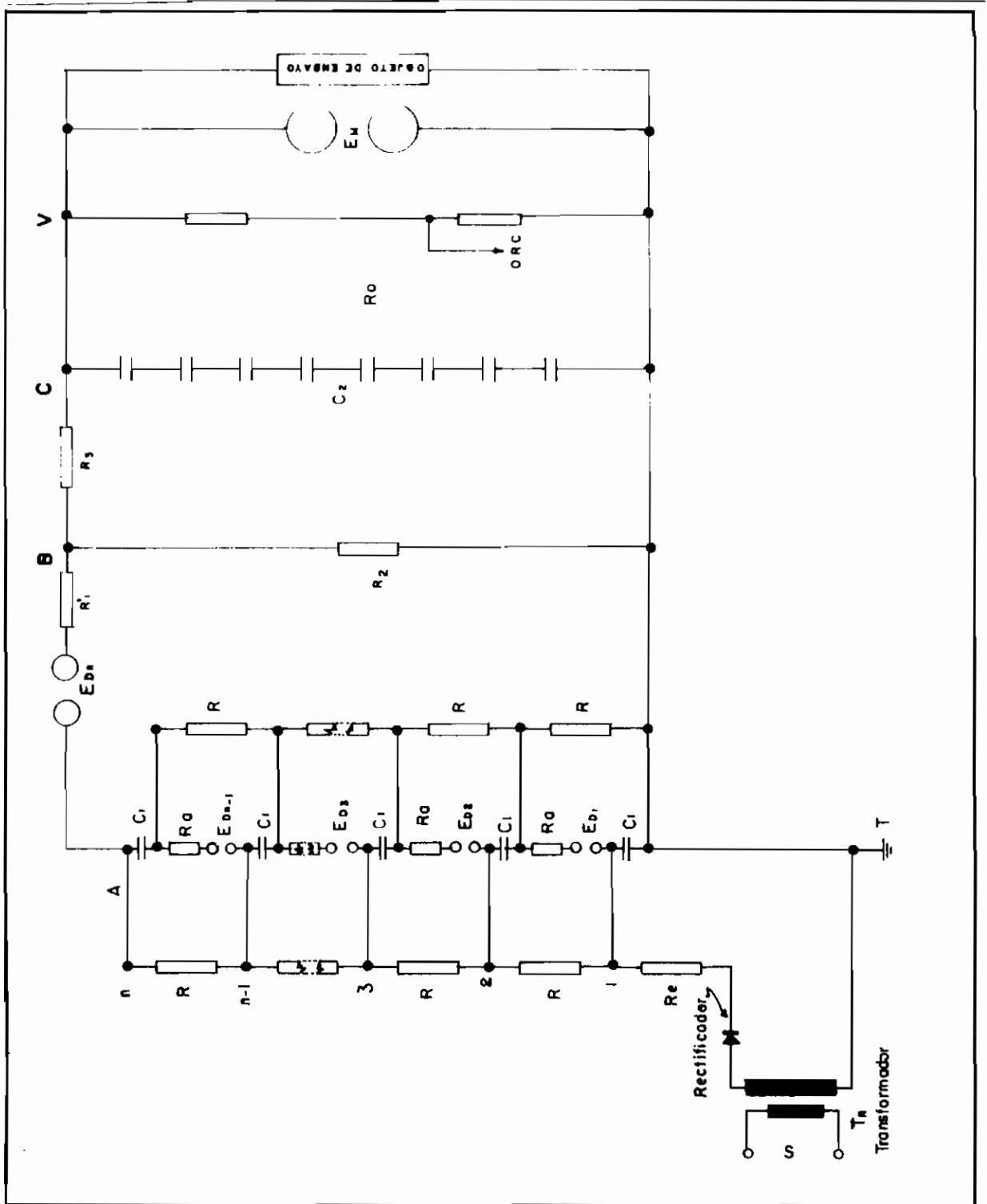
en el circuito T-A-B.

c) R_o , que es un divisor de tensión resistivo, el cual se conectaría al osciloscopio de rayos catódicos con el objeto de observar y realizar las mediciones respectivas en la onda generada.

d) Las resistencias de carga R que generalmente no acusan ninguna influencia sobre la forma de la onda.

e) Las esferas de medida E_M entre las cuales se produce la descarga y que según las tablas de la rigidez dieléctrica del aire nos permiten determinar el valor del voltaje de cresta de la tensión de impulso.

En la práctica, el proceso se inicia al producir una descarga en las esferas de encendido E_{D1} , lo cual desencadena una serie de otras descargas en las otras esferas. Esto se consigue por varios métodos, uno de los cuales es acercar las esferas mediante un pequeño motor accionado a distancia. También hay métodos electrónicos con idénticos resultados.



Generador de tensiones de impulso.

Esquemas simplificados de generadores de impulsos.

Los siguientes serían los diagramas equivalentes de los generadores de choque en sus conformaciones más habituales:

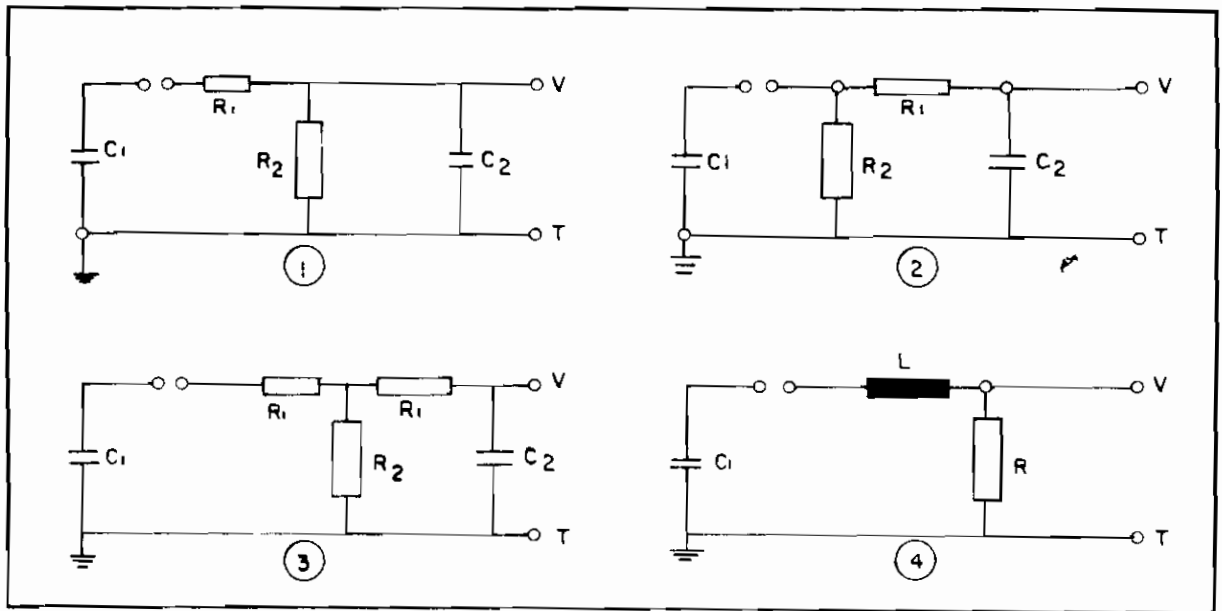


Fig. III-16.

Siendo los tres primeros los más utilizados.

En el esquema (1); C_1 es el condensador de choque, C_2 es el condensador de carga; R_1 es la resistencia de amortiguamiento y R_2 la resistencia de descarga. La forma de la onda está determinada por la tensión creada en la resistencia R_2 por la corriente de descarga del condensador de choque. La forma del frente de onda, depende del condensador de carga y de la resistencia de amortiguamiento a través de la cual se carga el condensador.

o ----- o

Medición de voltajes de impulso.

a) Con esferas espinterométricas:

El voltaje de cresta de una onda de choque puede medirse de la misma forma como se hacía para medir los voltajes de cresta en las altas tensiones alternas.

Una descarga es prácticamente instantánea en el momento en que se ha llegado al valor de perforación del aire para una determinada distancia; esto hace posible la medición de valores, casi instantáneos, de tensión máxima.

Con esferas se puede medir voltajes desde aproximadamente 2 kV. hasta 2.500 kV. por medio de espinterómetros utilizando la calibración respectiva para las condiciones normales de presión y temperatura ambiente.(tablas).

Como recomendación para las medidas se debe tener en cuenta que la distancia entre las esferas no sobrepase el 50% del diámetro de modo que los resultados tengan un límite de error de un 3%. Además el voltaje de impulso, de ruptura, será el que se produzca en por lo menos un 50% de las aplicaciones.

Se reconocen como standard los siguientes diámetros de las esferas en centímetros: 2,0; 5,0; 6,25; 10,0; 12,5; 15,0; 25,0; 50,0; 75,0; 100,0; 150,0; y 200,0.

Corrientemente se utilizan esferas de latón, bronce, acero, cobre, aluminio o aleaciones ligeras. Es absolutamente necesario que se limpien las superficies de las esferas inmediatamente antes de su uso. Se debe obtener un alto grado de pulimento,(brillo). Hay que quitar las delgadas capas de grasa, polvo o herrumbre que se hayan depositado. Del mismo modo se deben tomar precauciones para que el ambiente que rodea a las esferas esté totalmente libre de polvo, partículas extrañas, fi-

bras, etc.

Antes de tomar lecturas hay que hacer un cierto número de descargas preliminares hasta que se tenga, (por comparación con otro método auxiliar de medida), una tensión de descarga lo suficientemente constante.

Corección para la densidad del aire:

El voltaje de ruptura en un espinterómetro crece al aumentarse la presión atmosférica y disminuye cuando sube el valor de la temperatura. Los valores dados en las tablas deben ser multiplicados por un factor de densidad del aire que viene dado por la expresión:

$$\delta = 0,386 \frac{P}{273 + t^{\circ}}$$

P: Torr. (mm de Hg), presión barométrica.

t^o; Temperatura en grados Celcius.

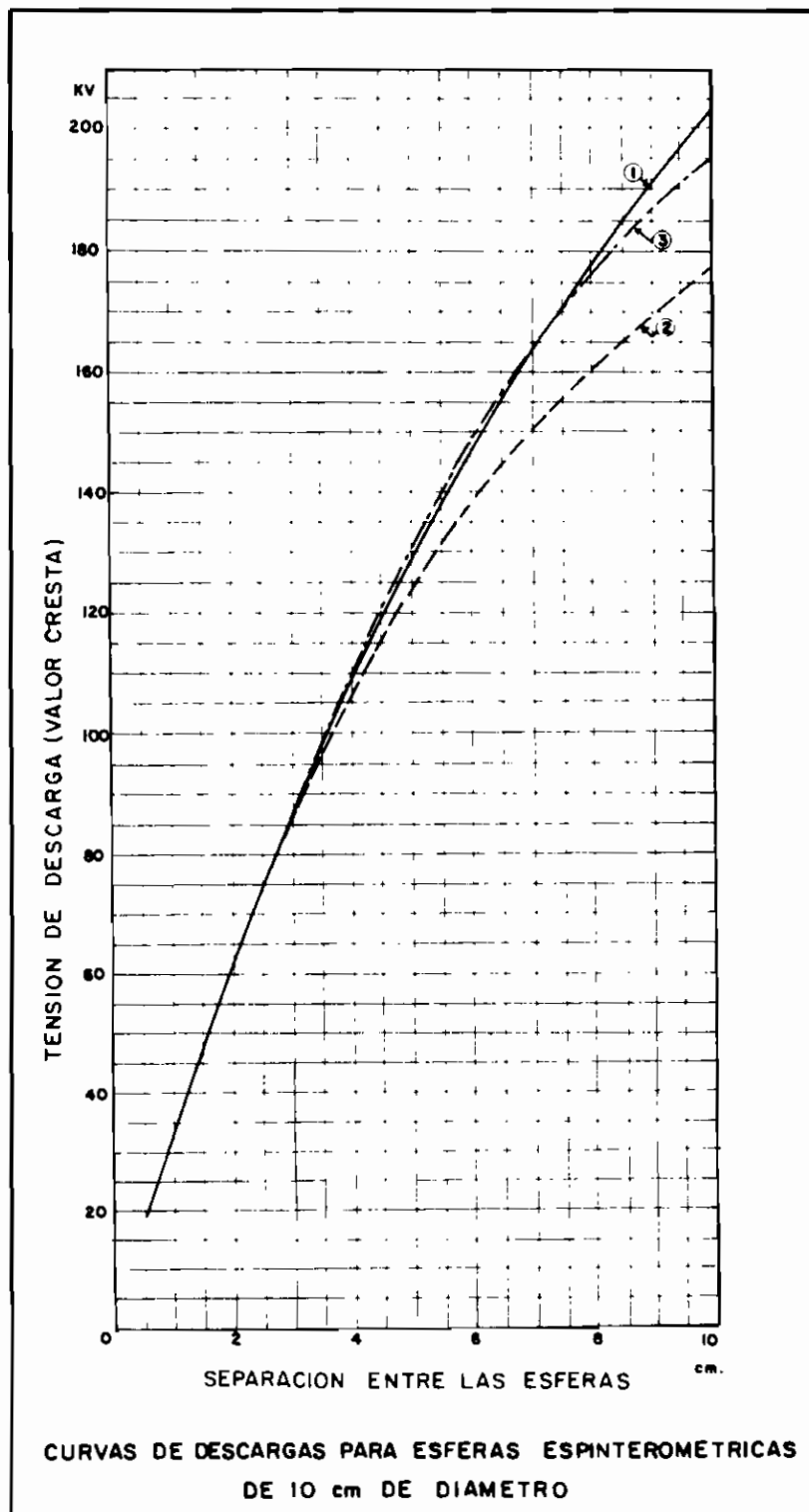
Debemos considerar además que el voltaje de ruptura es función de la humedad del aire. Las tablas se refieren a un contenido de vapor de agua de 11,0 gr/m³.

En la práctica, con el objeto de considerar pequeñas irregularidades en las esferas o alteraciones en la densidad del aire, se debe multiplicar los valores de las tablas, por "k" en lugar de "δ".

δ	k	δ	k	δ	k
0,70	0,72	0,85	0,86	1,00	1,00
0,75	0,76	0,90	0,90	1,05	1,05
0,80	0,81	0,95	0,95	1,10	1,09

(valores experimentales)

Curvas de descarga para dos esferas de 10 cm. de diámetro en condiciones normales de presión y temperatura.



En el gráfico anterior, tenemos las curvas de descarga para esferas espirométricas de 10 cm. de diámetro que se definen así:

Curva 1): Sirve para una disposición simétrica de las tensiones del transformador, es decir con ninguno de los terminales conectados a tierra; los datos de descarga son para tensiones alternas de baja frecuencia y tensiones continuas y de choque positivas o negativas.

Curva 2): Para una disposición asimétrica de las tensiones, o sea con el un terminal del transformador conectado a tierra. También para tensiones alternas de baja frecuencia y para tensiones continuas y de choque negativas.

Curva 3): Sirve para una disposición asimétrica de las tensiones del transformador, o sea con un polo conectado a tierra, y sus valores son para tensiones continuas y de choque positivas.

Se puede ver en estas curvas que la tensión de descarga con respecto a la separación entre las esferas no sigue una función lineal o sea que al duplicar la distancia no se duplica la tensión de descarga, sino que se hace menor; esto se debe a que al aumentar la distancia, no se aumenta en forma proporcional la superficie de evacuación del calor producido por el esfuerzo dieléctrico en el aire, lo cual hace que se eleve la temperatura y por tanto disminuya la rigidez dieléctrica del aire, produciéndose la descarga un poco antes. (ver ensayos con tensiones alternas sobre materiales aislantes, en este mismo capítulo).

Con el objeto de demostrar experimentalmente la variación del voltaje de descarga al variar las condiciones atmosféricas de presión y temperatura, se ha elaborado la siguiente tabla de tensiones de ruptura para esferas de 5cm. de diámetro, en el laboratorio

de la Escuela Politécnica de Quito.

Datos generales:

Presión: 550 Torr.

Temperatura: 18,5 °C

Diámetro de las esferas: 5 cm.

Relación de transformación: 100.000/220: 455

Factor de corrección: $\delta = 0,729$

Separac cm	Tablas		Correcc.		Lecturas		Cálculos	
	\hat{kV}	\hat{kV}	(1) Vef.	(2) kVef.	(1) \hat{kV}	(2) \hat{kV}		
0,5	17,50	12,75	20,2	9	13,0	12,74		
1,0	32,0	23,34	38,4	17	24,7	24,1		
1,5	45,60	33,20	53,1	24,2	34,18	34,9		
2,0	57,40	41,80	66,9	31,4	43,1	44,4		
2,5	67,20	48,90	78,5	36,9	50,5	52,2		
3,0	75,40	54,90	87,0	41,2	55,9	58,3		
4,0	(83,40)	(60,70)	(100,0)	(64,40)		

Es muy importante para este ensayo el hecho de que la presión es solamente 550 Torr. lo que equivale a una reducción de hasta un 72% de la presión normal.(760 Torr.)

La medida de la tensión, para comparación con la de la descarga de las esferas, se la hizo con el voltímetro en el primario del transformador elevador,(1), multiplicando los valores por la relación de transformación,(455); y además utilizando un voltímetro electrostático en paralelo con las esferas, (2). El valor de la tabla es la media aritmética de cinco lecturas di-

ferentes, con un intervalo de aproximadamente un minuto.

Se puede ver una notable variación de los valores expresados en las tablas y la relativa exactitud de la fórmula de corrección, es por esto, recomendable como primera parte de un programa de ensayos la elaboración de una tabla de descarga para esta altura sobre el nivel del mar, considerando además distintas polaridades de los electrodos.

Como conclusión podemos sacar que el error medio porcentual, (con respecto al valor corregido de las tablas), es para el voltímetro de baja tensión un 3% y para el voltímetro electrostático un 5,5%, lo que indica la relativa exactitud de los distintos métodos de medida.

*Medición mediante el Osciloscopio de Rayos Catódicos.

El osciloscopio de rayos catódicos es un medio excelente para medir y observar las ondas de impulso.

Para estos fenómenos de desarrollo tan rápido se construyen aparatos especiales con tiempos de barrido de pocos microsegundos, que permiten analizar la onda ya sea en su frente escarpado como en la "cola" de decrecimiento retardado.

Todo esto es importante, sobre todo, para estudiar el momento de ruptura de los aislamientos sólidos o para saber si se ha producido la perforación en aislamiento de cables, transformadores, generadores, etc. El oscilograma indica, mediante un descenso brusco de la tensión, cuál ha sido el voltaje de perforación y a qué tiempo se ha producido.

El acoplamiento del osciloscopio al generador de impulsos se lo hace mediante un divisor de ten-

sión calibrado. Este puede ser resistivo o capacitivo y tiene que ser hecho de tal manera que no se produzca distorsión o errores de consideración en la onda que debe ser registrada.

Generalmente se acopla una cámara fotográfica a la pantalla del osciloscopio para registrar estos fenómenos transitorios de muy corta duración.

Ensayos con tensiones de impulso:

Las ondas especificadas por las distintas normas, sirven para hacer ensayos sobre:

- a) Materiales.
- b) Aisladores.
- c) Descargadores.
- d) Condensadores.
- e) Cables.
- f) Transformadores.

a) Materiales:

Se preparan muestras delgadas y de forma plana con el objeto de establecer la gradiente dieléctrica, (para impulso, de un material aislante, que puede ser de naturaleza celulósica, plástica o mineral; estas muestras se colocan entre dos electrodos de tal manera contruídos que la descarga se realice en la parte de material aislante, muestra seca o impregnada, sometida a un campo eléctrico uniforme. El tamaño de los electrodos, su forma y las características exter-

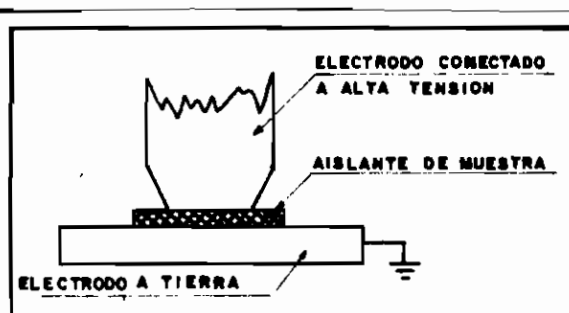


Fig. III-18

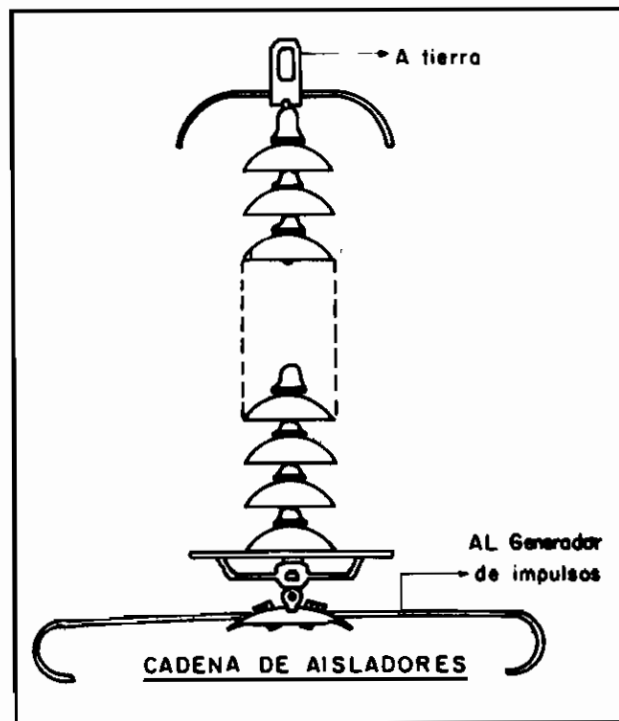
nas de las muestras, se encuentran normalizadas. En muchos casos el sistema completo está dentro de una cámara aislante para hacer observaciones de presión, humedad, etc., a la cual se produce la perforación.

Para los problemas de coordinación, adquieren particular importancia las pruebas de impulso que se efectúan sobre muestras de "presspan" y de aceite, elementos fundamentales del aislamiento de los transformadores.

b) Aisladores:

Se trata de los aisladores para la transmisión y distribución de la energía eléctrica, pueden ser de suspensión o de apoyo (PIN).

Estos elementos se los prueba montándolos en crucetas metálicas en la misma forma como van a estar en la realidad. La tensión de impulso se aplica a un tramo de conductor de dimensiones iguales, (sección transversal y forma), a las que tendrán en la práctica.



Las normas establecen las distancias críticas y los límites de separación entre los materiales a probar y los elementos conectados a tierra, como cru-

cetas, herrajes, paredes, piso, etc., para la seguridad del ensayo.

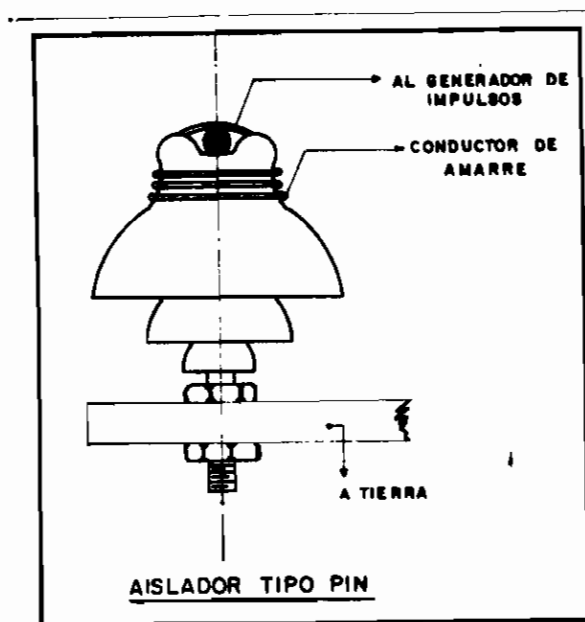


Fig. III-20

c) Descargadores: (pararrayos).

Cuando se hace el ensayo sobre equipos de protección como descargadores y válvulas de sobretensiones, hay que tener en cuenta que estos equipos van a servir para la coordinación del aislamiento de un sistema. La tensión de encendido y las características de descarga de los dispositivos de protección, bajo las peores condiciones posibles, con un cierto margen de seguridad, determinan el nivel de protección adecuado. El nivel básico de aislamiento, (BIL), de los aparatos, aisladores, etc., que es el valor de cresta del impulso de tensión que pueden resistir, debe hallarse, (dentro de un margen adecuado), por encima del grado de protección proporcionado por el descargador.

Los márgenes de protección adecuados, dependen de la distancia entre los descargadores y los equipos; la importancia del servicio; el costo de los materiales

a proteger; la frecuencia de las sobretensiones atmosféricas peligrosas, etc.

En la coordinación, el descargador debe ser el punto más "débil" de la instalación eléctrica.

Los descargadores se someten a pruebas entre las cuales la más importante es la llamada de "50% de encendido", o sea que se aplica una tensión que va a producir la descarga en el cincuenta por ciento de los casos; con polaridad positiva y negativa.

En realidad hay escasez de normas que establezcan los límites inferiores y superiores del valor de la cresta de la tensión de prueba; pero en todo caso, ésta se establece en función de la tensión de ejercicio y de la coordinación del aislamiento en el sistema eléctrico tomando en cuenta valores apropiados de tensión para los aisladores y transformadores.

Hay que tener en cuenta, además, que en el momento de encendido del descargador, se descarga a tierra no solamente la onda de choque sino también la corriente de frecuencia industrial de la línea es decir hay una falla a tierra aunque sea de muy poca duración. Es por esto que en las pruebas hay que controlar el efecto de válvula del descargador, considerando que la resistencia del mismo varía inversamente con la tensión.

Hay que determinar, en los ensayos, cuál va a ser la tensión residual para poder coordinar el aislamiento de los otros equipos. Estas últimas pruebas especiales están todavía en un plano de investigación y no han sido normalizadas.

d) Condensadores:

Los condensadores estáticos son dispositivos que están siendo muy utilizados en líneas de transmisión para obtener un mejor regulación del voltaje de

la línea y para componer el factor de potencia de ciertas instalaciones. Generalmente se los coloca cerca o en las subestaciones en el lado de alta tensión, lo cual hace que éstos se vean expuestos a tensiones de impulso provenientes de las líneas de transmisión o directamente de fenómenos atmosféricos. En realidad, por su propia capacitancia, estos elementos están auto-protegidos contra las ondas de choque, pero de acuerdo a ciertas especificaciones, es necesario hacer pruebas de laboratorio sobre ellos.

Existen dos tipos de pruebas:

a) Prueba de impulso para condensadores que están en servicio normalmente con sus dos terminales conectadas a las líneas. Esta se hace aplicando una onda de $1,5/40$ o 1.50 microsegundos, entre los dos terminales unidos y el recipiente de tierra del condensador. Se hacen 5 pruebas con cada polaridad, con una tensión de cresta indicada en las tablas de especificaciones.

La ausencia de falla y la forma de la onda se controla con el osciloscopio.(ORC).

b) Prueba de impulso y de descarga para condensadores que tienen normalmente uno de sus polos conectados a tierra. En esta caso se hace una prueba entre el terminal de línea y el terminal de tierra. Generalmente debido a la capacitancia del condensador, no se puede tener un frente tan escarpado como el que indican las normas así que la prueba se limita a que la amplitud media permanezca hasta 40 o 50 micro-segundos con valores de cresta especificados en las tablas respectivas. La ausencia de falla se comprueba con el ORC.

Algunas veces, en las pruebas comerciales, por acuerdo entre el fabricante y el cliente, se substituye la anterior prueba de impulso por una prueba de descarga.

El condensador tiene que ser cargado con una tensión continua y luego descargado a través de un espacio espinterométrico lo más cerca posible de los terminales. Esta prueba debe ser hecha por dos veces en el intervalo de un minuto.

En caso de que la planta de pruebas no tenga capacidad suficiente para probar el condensador completo, las pruebas se hacen sobre una parte componente del mismo, con una tensión adecuadamente proporcional.

e) Cables:

Los circuitos de transmisión están hechos a menudo por secciones de cables y líneas aéreas conectadas en serie, lo que hace posible que se presenten sobretensiones de origen atmosférico en el aislamiento del cable.

Aún cuando el circuito sea totalmente subterráneo, es posible que el aislamiento del cable tenga que soportar sobrevoltajes transitorios causados por las operaciones de conexión y desconexión. Por esta razón es importante que se tengan ciertos datos de pruebas de impulso en cables aislados para predecir su comportamiento en la instalación real.

Actualmente no existen normas industriales de pruebas de impulso en cables. En un ensayo hay que determinar experimentalmente entre otras cosas, el efecto del envejecimiento del aislante; el comportamiento según la forma de la onda y su polaridad, etc.

Para la prueba se dispone de una muestra del cable que tiene que ser lo más corta posible, ya que un cable representa una elevada carga que se pone al generador de impulsos. Se disponen, generalmente los extremos del cable sobre aisladores especiales que se conoce que pueden resistir a esa tensión, y se aplica el potencial al cable.

El efecto se estudia mediante oscilogramas, con lo que se puede determinar si ha habido descarga o no en la muestra ensayada.

Generalmente hay que procurar que el cable esté lo más cerca posible del generador de impulsos para que debido a la inductancia de las conexiones y la capacidad propia de la muestra, no se deforme la onda estándar que se aplica.

f) Transformadores:

Los ensayos de impulso para un transformador, se llevan a cabo con el propósito de determinar si ocurre la perforación o el contorneo de su aislamiento cuando un potencial de prueba específico se aplica a su arrollamiento.

Las pruebas con sobre-tensiones a frecuencias industriales no reemplazan a las de impulso, por cuanto lo único que sucede es que el aislamiento entre espiras sufre un esfuerzo uniforme. En cambio, la distribución del potencial de choque es completamente no lineal. Este último ensayo trata de demostrar que el transformador puede resistir esfuerzos desiguales sin dañarse.

En realidad no se puede esperar que un transformador resista una sobretensión de origen atmosférico en toda su fuerza, (por esto, se las desvía hacia tierra mediante descargadores), pero hay que prever que por lo menos una parte de la onda, (tensión residual), llegue hacia él; por esto se hace este tipo de ensayo.

En la práctica, todos aquellos terminales del transformador que están conectados a tierra, deberán ser conectados a tierra, ya sea directamente o por medio de resistencias adecuadas.

Es necesario conectar, en paralelo con la parte del transformador que está siendo probada, un par de esferas espinterométricas para medición y para cortar la

onda; y un descargador de puntas, suficientemente calibrado, para protección del transformador.

El proceso de ensayo propiamente dicho, varía según las varias especificaciones de los distintos países. (ver capítulo de Normas de ensayos).

0-----0

CAPITULO IV

Características del equipo de laboratorio para ensayos de Alta Tensión.

Los equipos fundamentales que intervienen en la generación medida y pruebas con Alta Tensión:

- 1.- Transformador elevador.
- 2.- Rectificadores.
- 3.- Condensadores.
- 4.- Resistores.
- 5.- Esferas espinterométricas.
- 6.- Divisores de potencial. (resistivos y capacitivos).
- 7.- Aparatos de medida y observación:
 - Voltímetro de cresta.
 - Voltímetro de valor eficaz.
 - Osciloscopio de rayos catódicos.
- 8.- Sistemas de control.

Con el objeto de tener una idea completa del montaje y operación de todos estos equipos, que aquí se describen aisladamente, se ha creído útil hacer una pequeña mención al equipo completo instalado en la Escuela Politécnica Nacional de Quito, al final de este capítulo.

1.- Transformador elevador:

El principio básico es el mismo que para cualquier transformador. Se tiene dos arrollamientos: un primario que recibe la baja tensión y un secundario que entrega la elevada tensión necesaria para los ensayos.

Los transformadores de ensayos son diseñados para distintas potencias y generalmente con características tales que pueden resistir perfectamente las pruebas de corta duración a que se someten los equipos bajo ensayo. Existen muchos tipos de transformadores de

pruebas dependiendo esto, principalmente, de la casa constructora, así, se construyen con tensiones que varían desde 1 kV y 100 kV. hasta 750 kV o más; con distintos enbornamientos para distintos voltajes; con conexión de los arrollamientos en cascada; con aislamiento de resinas sintéticas o aceite aislante; con capacidades de potencia desde unos 2 kVA hasta 1500 kVA o más según los casos; etc.

Conexiones:

En la mayoría de los casos, uno de los bornes del lado secundario se encuentra conectado a tierra, o presenta la posibilidad de conectarlo mediante dispositivos adecuados. La alimentación de baja tensión varía desde 220 V hasta 400 V en los más grandes y debe ser regulada desde un pupitre de control hasta alcanzar los niveles de tensión deseados. Esta regulación se hace mediante el empleo de otro transformador que permite hacer la variación en pasos muy finos y desde cero voltios hasta el valor deseado.

Núcleo:

El núcleo está fabricado de material magnético de la más alta calidad y con un valor de saturación tal que no se produzca deformación de la onda de tensión alterna ya que de otra manera se falsearían los resultados de las mediciones. Además la conformación física misma debe ser cuidadosamente hecha para que no haya dispersión magnética y se tengan perturbaciones en los instrumentos.

Arrollamientos:

Generalmente el arrollamiento de baja tensión está hecho de una sola bobina fabricada con conductor de cobre aislado con papel. Entre los arrollamientos de

baja y alta tensión hay una pantalla metálica protectora conectada a tierra con el núcleo, tiene el objeto de hacer un aislamiento electrostático entre primario y secundario. El secundario está formado por una gran cantidad de bobinas separadas por material aislante. Generalmente todo esto va sumergido en aceite de transformadores, o cubierto completamente por una resina especial que tiene la ventaja que las dimensiones pueden conservarse pequeñas y se evita toda posibilidad de incendio.

Uno de los extremos del arrollamiento secundario, (alta tensión), va conectado a tierra, de modo que siempre se obtiene un nivel de potencial con respecto a tierra en el otro extremo. Este va conectado, a través de un "bushing", (aislador pasa-muros), de porcelana, al terminal de Alta tensión que puede ser una esfera de latón cromada provista de dispositivos especiales para conectarla a los otros elementos de la instalación de ensayos.



.IV-2

EMIL HAEFELY & CIE AG BASEL

Estas fotografías, (tomadas de un boletín informativo de la compañía Suiza HAEFELY), nos muestran grupos de transformadores de prueba conectados en cascada, lo que permite obtener tensiones alternas muy ele-

vadas, en este caso tenemos 600 kV. y 1.000 kV. en las dos fotografías respectivamente, con una potencia de 150 kVA a plena carga. Se puede observar que el segundo transformador de la cascada se encuentra mucho más alto, con respecto al suelo, que el primer transformador, al cual se le parece mucho; esto se debe a que como se va a duplicar la tensión en el segundo transformador hay también que aumentar el aislamiento con respecto a tierra en la misma proporción.

Rectificadores:

Las unidades rectificadoras que se usan en las instalaciones de Alta Tensión, están formados por elementos de selenio o silicio. Como en casi todos los equipos de ensayo, no son unidades standard y generalmente están contruídos para formar parte integral de los generadores de tensión continua, (cascada de Greinacher), o de los generadores de impulsos de voltaje.

El principio básico de su funcionamiento es el mismo que de cualquier rectificador de baja tensión, encontrándose la diferencia en el aislamiento y en el elevado voltaje inverso de pico.

Generalmente se hallan montados en un recipiente prismático o tubular de material aislante como resinas sintéticas o papel cartón barnizado, lleno de aceite de transformadores. Internamente se hallan conectados los distintos elementos de rectificación, en forma de banco, ya sea serie o paralelo, con el objeto de obtener los niveles adecuados de tensión inversa de pico y la suficiente capacidad de conducción de corriente. En muchos casos se prevén conexiones externas en los extremos o en el punto medio del banco, para poder hacer fácilmente con ellos ciertas instalaciones especiales co-

mo dobladores de tensión o conexiones de instrumentos de medida.

3.- Condensadores:

Los equipos e instalaciones de Alta Tensión, utilizan condensadores especiales caracterizados principalmente por la elevada rigidez dieléctrica de los materiales que utilizan y también por el aislamiento exterior suficientemente grande. Hay varios tipos entre los que podemos distinguir:

Condensadores de aire.- Tienen por lo general formas esféricas, planas o cilíndricas de acuerdo con su utilización. El tamaño es relativamente grande puesto que la rigidez dieléctrica del aire es pequeña; se necesitan, entonces, separaciones entre las placas de un orden considerable. Como la capacitancia es función inversa de la separación entre placas, se pueden tener con estos condensadores solamente pequeñas capacitancias. (algunos picofaradios).

Condensadores de gas a presión.- Están basados en que la rigidez dieléctrica de los gases aumenta al aumentar la presión, y la constante dieléctrica permanece casi constante. En la práctica se construyen condensadores de estos tipos en forma cilíndrica hasta algunos centenares de kilovoltios; manteniendo las dimensiones relativamente pequeñas se pueden tener capacidades de algunos cientos de picofaradios. Teóricamente se pueden hacer con cualquier gas, pero preferentemente se usa nitrógeno, (por ser inerte), a una presión de unas 15 o más atmósferas.

Condensadores de porcelana.- Se construyen depositando por dentro y por fuera de recipientes de porcelana un depósito metálico, (por evaporación del metal que se quiere depositar o mediante

electrolisis), se consiguen capacidades de 1000 a 2000 pico-faradios y ángulos de pérdida de aproximadamente 1° .

Condensadores de vidrio.- Se utilizan vidrios especiales con elevada rigidez dieléctrica, factor de pérdida pequeño y coeficientes de presión y temperatura insignificantes. Sirven para fines técnicos y mediciones de precisión. Se consiguen elevadas capacidades.

Para ciertas mediciones especiales, por ejemplo con el puente de Schering, se consideran patronos a los condensadores de aire con cilindro protector de Petersen, los de gas a presión, y los recipientes de vidrio "Minos".

4.- Resistores.- Son hechos generalmente de carbón o alambre de tal forma que se tenga la menor inductancia y capacitancia posible, para no afectar, por amortiguamiento, la forma de onda de los generadores de Alta Tensión.

Se construyen en tubos de material aislante como porcelana, cartón, etc., y tienen un aislamiento de aceite o de aire para que pueda evacuarse fácilmente el calor producido. Los hay de tipos muy diversos, entendiéndose por esto: la forma, el montaje, la aplicación, la tensión a aplicar, la potencia que puede ser disipada sin daño, la corriente nominal para servicio continuo, etc.

5.- Esferas espinterométricas.

Como ya se había explicado antes, se utilizan dos esferas metálicas para medir el voltaje de cresta de una Alta Tensión.

Generalmente la causa del error en la medida proviene de la dispersión del campo eléctrico en las esferas debida a irregularidades en la superficie, presencia de polvo y humedad en el aire, etc.; esto se reduce tomando un valor medio aritmético de varias medidas y acondicionando la superficie de las esferas de modo que

estén limpias y brillantes.

En las medidas de tensión, se prescriben, según ciertas tablas normalizadas, cuál debe ser la distancia entre las dos esferas para una determinada tensión de descarga y para un diámetro, de las esferas, un dispositivo de separación de las esferas que puede ser manual o accionando un motor desde el pupitre de mando.

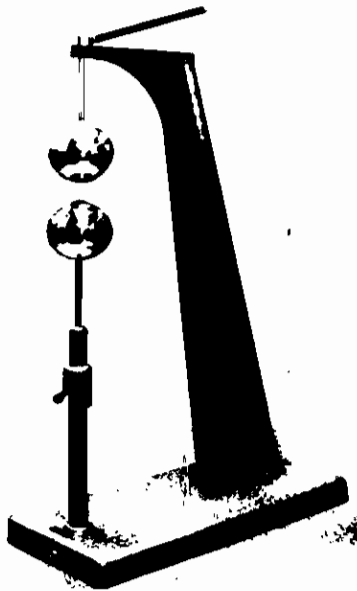
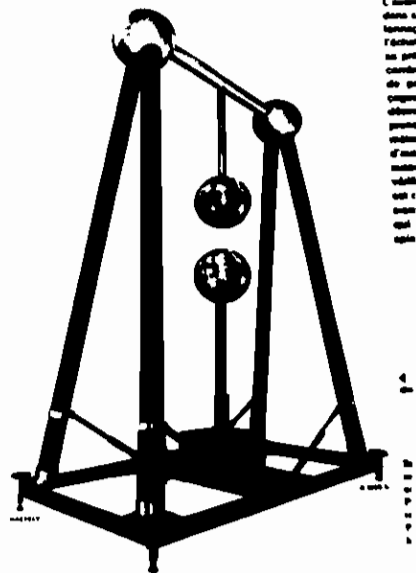


Fig. 2. Mobile sphere gap with spheres having a dia-

F.IV-3



F.IV-4

En las fotografías anteriores (tomadas de un boletín informativo de las empresas ASEA, Suecia, y HAEFELY, Suiza respectivamente) podemos ver claramente la forma y disposición de las esferas de medida. Las de la izquierda son de 125 mm de diámetro y las de la derecha son de 750 mm.

En la mayor parte de los casos, es la esfera superior la que permanece fija, sujeta mediante soportes aislantes a una altura determinada; es en cambio, la esfera inferior la que a más de estar conectada a tierra tiene la facilidad de subir o bajar para aumentar o dis-

minuir la distancia de descarga.

En algunos casos se instalan resistores en serie con las esferas, con la función de limitar la corriente de descarga y evitar que se produzcan daños en la superficie de las esferas. En las corrientes alternas este resistor produce un amortiguamiento de las oscilaciones de alta frecuencia en el circuito resonante formado por la capacitancia de las esferas y la inductancia de los conductores entre éstas y el objeto de ensayo o el generador.

6.- Divisores de potencial.

Con el objeto de derivar una parte pequeña de la Alta Tensión para efectos de medida y observación, se utilizan divisores de tensión que pueden ser según los casos resistivos o capacitivos.

Divisores de tensión capacitivos:

Según la figura siguiente, se conectan en serie dos condensadores de capacidades C_1 y C_2 . El voltímetro

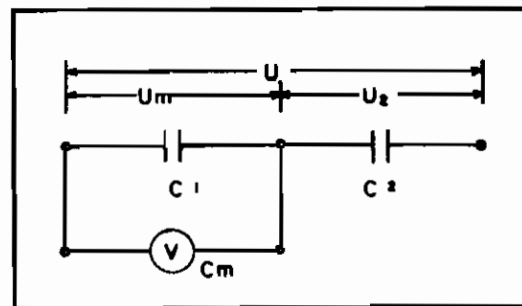


Fig.IV-1

de capacidad C_m , se conecta en paralelo con los anteriores y se tiene:

$$U_m (C_1 + C_m) = U_2 \cdot C_2 \quad \text{y } U = U_m + U_2$$

$$U = U_m + \frac{C_1 + C_m}{C_2} U_m = U_m \left(1 + \frac{C_1 + C_m}{C_2} \right)$$

En la práctica, hasta unos 200 kV. aproximadamente, el divisor de tensión consiste en varios condensadores. Se procura dar al circuito una forma simétrica y se tiende a que la capacidad propia del instrumento de medición, conectado al secundario del divisor, influya lo menos posible en la capacidad total.

Divisores de tensión óhmicos:

La división de tensiones también puede realizarse por medio de resistencias óhmicas. Para esto, se conectan los aparatos de medida en paralelo con una parte de la resistencia total, (muy elevada), en el lado en que está conectada a tierra. Estos divisores de tensión, constituidos por resistencias de alambre, de inductancia y capacitancia muy pequeñas, pueden usarse con voltajes hasta y superiores a los 100 kV. Se los puede usar para medir tensiones continuas y alternas. Si se tiene frecuencias altas, se deja sentir notoriamente, los efectos de su capacidad propia, manifestados en la variación de la resistencia.

Ambos tipos se contruyen de formas muy diversas y para distintos usos, por ejemplo, los hay especiales para tensiones alternas a frecuencias industriales, generalmente capacitivos. Se hacen para tensiones de choque de cualquier magnitud, (1.000 a 2.000 kV), generalmente resistivos; cuando se trata de medir tensiones continuas se utilizan divisores de tensión de resistencia ya que los condensadores bloquean este tipo de tensión.

7.- Aparatos de medida y observación:

Los hemos dividido en tres grupos fundamentales:

a) Equipo de medida del voltaje de cresta y del valor medio cuadrático, (valor eficaz), de una alta ten-

si3n alterna:

Generalmente este equipo consiste de tres partes fundamentales: condensador de medici3n, (ver divisores de tensi3n capacitivos); cable de medida, e instrumento de medida.

El cable de medida es un cable coaxial que une el condensador de medida en el lado de la alta tensi3n, con el instrumento de medici3n. Su car3cter de cable coaxial, sirve para llevar la se3al a medir y para mantener el instrumento a un potencial de tierra. Generalmente estos cables est3n adaptados a un instrumento en particular y para cambiarlo es necesario hacer una nueva calibraci3n.

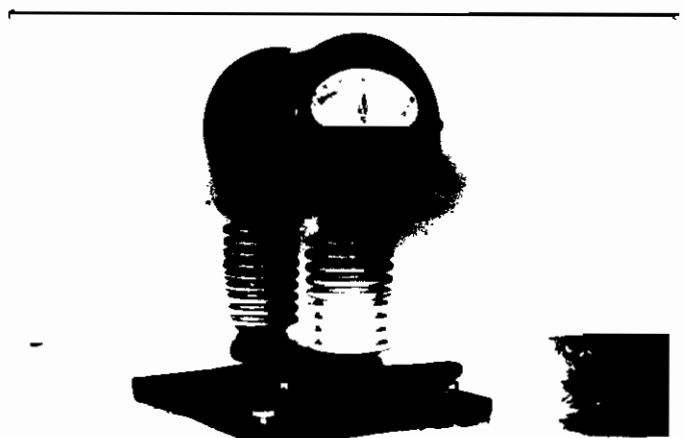
El instrumento de medici3n, no es m3s que un galvan3metro que mide la tensi3n de carga de un condensador, (dentro del instrumento), a trav3s de un rectificador. Puede medir el valor de cresta pues el condensador se carga con ese valor. Invirtiendo el sentido del rectificador mediante un conmutador, se puede medir el voltaje de cresta positivo o negativo. Para medir el valor medio cuadr3tico, (valor eficaz), simplemente se suprimen, (as3 mismo con otro conmutador) los condensadores y rectificadores internos, conectando el galvan3metro, a trav3s de una resistencia en serie, con la tensi3n a medir.

b) Equipo de medida de tensiones continuas:

Normalmente se utilizan volt3metros "amperim3tricos" comunes, utilizando divisores de tensi3n resistivos; estos volt3metros est3n colocados en el pupitre de mando.

Se utilizan tambi3n, (y con bastante frecuencia), volt3metros electrost3ticos, que sirven tambi3n para tensiones alternas. Estos volt3metros se basan en

la fuerza que desarrolla una diferencia de potencial, por tanto la indicación es proporcional al valor eficaz de la tensión. Están constituidos por dos electrodos, uno fijo y el otro móvil entre los cuales se aplica la tensión a medir, la forma redondeada de las dos placas grandes ha sido construída así para evitar cualquier formación de efecto "corona" y mantener un campo uniforme entre los electrodos. El rango de medición se puede aumentar o disminuir separando o acercando el electrodo posterior. Generalmente el electrodo donde está el cuadrante va conectado a la tierra común de la instalación.(ver fotografía siguiente).



F.IV-5

La fotografía muestra un voltímetro electrostático fabricado por la fábrica japonesa YEW, Yokogahua Electric Works, y que pertenece a la Escuela Politécnica de Quito.

c) Equipo de medida de tensiones de impulso:

Se utiliza también un divisor de tensión, un cable de medida y un instrumento especial.

Este instrumento se basa en el mismo principio que el anterior que mide tensiones de cresta, pero dado el carácter no repetitivo de la onda de impulso, existe un dispositivo automático de retención de la aguja indicadora en el valor máximo; después de la medida, se regresa la aguja al punto cero y se tiene listo el instrumento para hacer otra medición.

d) El osciloscopio de rayos catódicos,(ORC):

El osciloscopio de Alta Tensión, es un aparato especialmente dedicado a la grabación y observación de fenómenos transitorios de muy corta duración, producidos por un generador de voltajes de impulso. La observación se realiza mediante fotografías tomadas directamente de la pantalla.

El voltaje de impulso, aplicado al objeto bajo ensayo, es reducido a un valor bajo y llevado al osciloscopio mediante un cable de medida apropiado.

Los osciloscopios están equipados con dispositivos de calibración de tiempo y voltaje para que los oscilogramas puedan ser interpretados comparándoles con valores absolutos.

8.- Sistemas de control.

Para manipular las Altas Tensiones y poder trabajar con ellas, se utilizan pupitres especiales con mando a distancia.

Generalmente son consolas construidas con láminas de acero o aleaciones especiales. Están destinados a contener tres clases de equipo o elementos:

1.- Elementos de protección y señalización:
Aquí debemos mencionar la presencia de toda clase de interruptores y lámparas que con sus señales protejan al equipo y sobre todo al personal que trabaja en la

instalación. Podemos citar, por ejemplo: un switch principal operado con una llave que conecta y desconecta toda la alimentación; lámparas que indican la presencia de tensión en el primario y secundario del transformador de regulación y si la puerta de entrada ~~está~~ cerrada o abierta; switches desconectores para casos de emergencia; accionamiento de un interruptor automático de tierra; etc.

2.- Elementos de regulación y control: De éstos, los más importantes son: el transformador de regulación, y los accionamientos para los motores de las esferas espinterométricas. El primero es un transformador que varía la tensión secundaria, (que alimenta al transformador de prueba), desde cero hasta el máximo, casi siempre de 220 o 440 voltios; permite subir la tensión en pasos muy finos. En algunos casos cuando el tamaño no lo permite, estos transformadores no se encuentran en el pupitre de mando, sino solamente los elementos necesarios para regularlo a control remoto.

Las esferas espinterométricas, tanto de medida como de encendido, se acercan a se alejan mediante motores pequeños cuyo sentido de giro se regula desde el pupitre de mando mediante botones o manijas especiales.

3.- Elementos de medición: Aquí se encuentran los voltímetros de tensión de línea y de tensión regulada; voltímetros de "cresta" y de valor eficaz de la alta tensión, (conectados al divisor de tensión), voltímetro de tensión continua, amperímetros que dan la carga del transformador de prueba, frecuencímetros, medidores de potencia y energía, etc.

Finalmente el pupitre de mando incluye bornes

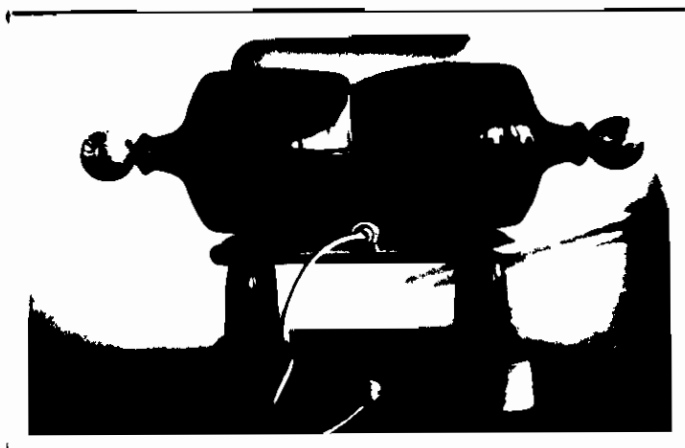
especiales para la alimentación del osciloscopio, que por razones de seguridad se lo conecta a través de un transformador de aislamiento con relación de transformación 1:1.

Equipo completo de Alta Tensión instalado en la Escuela Politécnica de Quito.

Recientemente se ha empezado con la introducción de equipos adecuados en las escuelas técnicas y universidades para un estudio sistemático de las técnicas de Alta Tensión.

La razón por la cual se describe el equipo instalado en la Escuela Politécnica es que se trata de un equipo completamente novedoso en la concepción y en la construcción. Es nuevo en el sentido de que permite, con un número reducido de componentes, el rápido montaje y desmontaje para ensayos con los tres tipos fundamentales de alta tensión: alterna, continua y de choque. Se trata, pues, de una instalación flexible, con componentes intercambiables.

Comprende una serie de resistores, capacitores, rectificadores, etc., que pueden ser unidos entre sí rápidamente para formar las conexiones fundamentales de ensayo con diferentes tipos de tensión. Los componentes se unen sin el uso de tornillos, tuercas, etc., permitiendo una conexión instantánea con buen contacto eléctrico y mecánico. Todos los resistores, condensadores, rectificadores, esferas espinterométricas, etc., tienen la misma longitud e idénticos terminales lo que facilita el manejo y el almacenamiento.



F. IV-6

Los datos característicos de la instalación son:

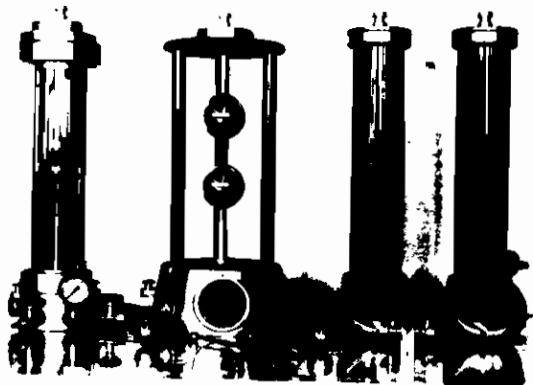
Tensión alterna 100 kV., 60 Hz., 5kVA
(con posibilidades para conexión simétrica y asimétrica).

Tensión continua: un estadio 130 kV., 5 mA
dos estadios 260 kV., 5 mA.

Tensión de impulso: un estadio ...130 kV., 60 watt.seg.
dos estadios.260 kV., 120 watt.seg.

Los elementos constitutivos pueden agruparse en cuatro grupos que son:

a) Elementos para la generación.- Transformador elevador,(fotografía anterior), rectificadores; condensadores de choque y de carga; resistores de carga, de protección, de amortiguamiento y de descarga; esferas de encendido.(ver fotografías siguientes).



F.IV-7

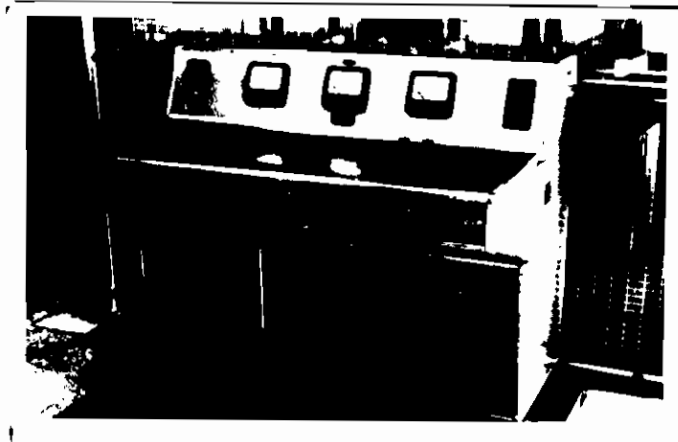
- b) Elementos de medida: Condensadores de medición y resistores, (divisores de tensión); esferas espinterométricas de medida, (fotografías anterior).
- c) Elementos para ensayos.- Todo tipo de electrodos, (planos, esféricos, cilíndricos, puntas, perfiles de Rogowsky, etc.); tanque de presión hasta 5 atmósferas con accesorios para investigaciones de rigidez dieléctrica,(gases y líquidos), a distintas temperaturas.
- d) Accesorios.- Pequeños motores para las esferas de medida y encendido, interruptor automático de tierra, soportes conductores y aislantes, piezas de unión, etc.

Por razones de seguridad, toda la instalación está confinada a una jaula metálica de protección, conectada con el sistema de puesta a tierra y que permite una buena visibilidad de los ensayos que se realizan en su interior (ver fotografía). Una puerta automática en la jaula elimina toda posibilidad de que haya tensión cuando se encuentra abierta.

El sistema de puesta a tierra, ha sido hecho de tal forma que a más de tener una muy pequeña resis-

tencia, (alrededor de 1,5 ohmios), ofrezca una elevada capacidad necesaria cuando se opera con tensiones de impulso, o se ensaya efecto corona.

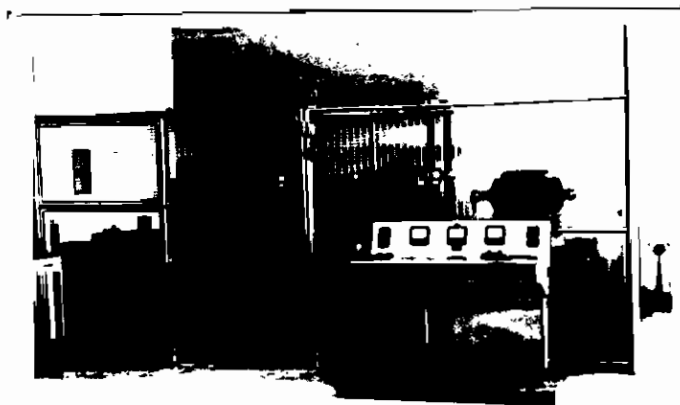
El tumbado, paredes y piso han sido recubiertos con una delgada red metálica con el objeto de disponer de una adecuada "jaula de Faraday".



F.IV-8

Todas las operaciones se hacen desde afuera sobre un pupitre de mando que centraliza las operaciones y las mediciones.

Completan la instalación, un osciloscopio especial para ondas de choque, voltímetros electrónicos y electrostáticos para valores eficaces y de cresta, cables coaxiales, equipo fotográfico, etc. La siguiente fotografía nos muestra la instalación completa.



F.IV-9

El equipo de Alta Tensión mencionado, fue proporcionado por la casa "Messwandler-Bau GmbH Bamberg/" de Alemania. El osciloscopio por la casa HAEFELY de Suiza.

NOTA: La descripción de este equipo ha sido hecha en base de boletines informativos de las casas constructoras, y de artículos publicados en revistas técnicas, que se detallan en la lista bibliográfica al final de esta tesis.

Oooooooooooooooooooooooooooooo

CAPITULO V

Normas de ensayos

Las regulaciones normalmente aceptadas para la realización de ensayos con tensiones alternas, continuas y de choque elevadas, tanto de carácter estable como transitorio, difieren enormemente según el tipo de ensayo y sobre todo según el país o la región en la cual se realizan estas pruebas.

Las normas o prescripciones generales, se refieren a tres aspectos fundamentales de la actividad de los laboratorios de Alta Tensión:

- 1.- Normas específicas para los ensayos.
- 2.- Medidas de buen funcionamiento.
- 3.- Medidas de seguridad.

1.- Normas específicas para los ensayos:

Se trata con esto, de determinar o regular todas aquellas variables que intervienen en un dispositivo específico.

Se clasifican en la misma forma que los ensayos, o sea: para materiales aislantes sólidos en que se incluyen pruebas sobre máquinas, (generadores, transformadores, etc.), pruebas sobre equipo en general, (condensadores, aisladores, pararrayos, disyuntores, etc.), pruebas sobre substancias aislantes; y además ensayos sobre materiales aislantes líquidos en que se hallan los aceites principalmente.

Estas normas son diferentes según los distintos países u organismos reguladores, entre los cuales los más importantes son:

Estados Unidos: NEMA-National Electric Manufacturers Association.

AIEE- American Institute of Electrical Engineers.

ASA- American Standard Association.

ASTM-American Society for Testing Materials.

Alemania VDE-Verband Deutscher Elektrotechniker.

Inglaterra BSS-British Standard Specifications.

Italia CEI-Comitato Elettrotecnico Italiano.

España AEE-Asociación Española de Electricidad.

Internacionales IEC-International Electric Commission.

Como se ve, es imposible explicar detalladamente las distintas normas para los diferentes ensayos, por esta razón se limita la exposición solamente a unas cuantas nociones de carácter general que podrían ser utilizadas como referencia.

Pruebas dieléctricas sobre transformadores.

Según las normas, el propósito de estas pruebas, cuyo desarrollo se explicó anteriormente, es demostrar que las cualidades del diseño, del trabajo, y del aislamiento son tales que la unidad en ensayo cumple con las especificaciones respectivas. Además, desde un punto de vista comercial y jurídico, las normas constituyen puntos fundamentales de las condiciones de contrato entre fabricante-vendedor y comprador de maquinaria y equipo eléctrico como son en este caso los transformadores.

Para indicar, como ejemplo, se describe a continuación las pruebas dieléctricas según ordenanzas norteamericanas.(ASA).

(1) Prueba estándar de impulso: Consiste en aplicar en sucesión, una onda completa reducida, dos ondas cortadas y una onda completa.

a.- Una "onda completa" es de la forma $1,5/40 \mu s$; generalmente de polaridad negativa para transformadores en aceite y positiva para el tipo seco; con magnitud de

cresta según normalización siempre de acuerdo con la tensión de servicio.

b.- Una "onda completa reducida" es similar a la anterior, $1,5/40 \mu s$ pero con un 50% o 70% del valor de cresta.

c.- Una "onda cortada" se forma conectando un espacio espinterométrico para causar la descarga, ruptura, en la cola de la onda aplicada. Se especifican según los casos el voltaje máximo y el tiempo mínimo de ruptura.

- (2) Prueba estandard de potencial aplicado: Consiste en aplicar un voltaje de baja frecuencia entre los arrollamientos y tierra, (con todos los demás arrollamientos conectados a tierra). Su duración es de un minuto y la tensión según los casos.
- (3) Prueba estandard de potencial inducido: En general consiste en aplicar entre los terminales de un arrollamiento hasta dos veces su voltaje nominal. La frecuencia se duplica también para evitar sobreexcitaciones del núcleo. La duración será de 7.200 ciclos pero nunca mayor que un minuto.

Especificaciones sobre aisladores.

Actualmente no existen regulaciones específicas en cuanto a la fabricación de aisladores a más de aquellas que son producto de la experiencia de los fabricante. Existen sin embargo publicaciones, (High Voltage Insulators Standards de NEMA, por ejemplo), en las cuales se precisan: dimensiones; voltaje de contorno en seco y en húmedo; voltajes de perforación; características de radio-interferencia; distancias de arco para aisladores tipo PIN, poste y de suspensión; características de resistencias mecánicas, etc.

De igual manera, estas normas prevén los varios voltajes de prueba, y establecen los distintos ensayos que tienen que hacerse. También se indican los métodos de montaje en los soportes y las correcciones para las distintas condiciones de presión barométrica, temperatura y humedad.

Es muy importante anotar que las pruebas, especialmente sobre largas cadenas de aisladores, deben ser hechas bajo condiciones cuidadosamente controladas, con equipo de prueba calibrado y los resultados corregidos a las condiciones atmosféricas estándar para obtener respuestas seguras y confiables. Las condiciones superficiales del aislador, y los objetos que se encuentran alrededor, muchas veces producen efectos impredecibles en la teoría. El Comité de Sobretensiones y aislamiento de la AIEE, reporta que de todos los resultados de pruebas, (aún en los mejores laboratorios), están sujetos a una tolerancia de un 5% aún en los ensayos con frecuencias industriales.

Especificaciones sobre máquinas eléctricas rotativas:

El aislamiento entre los conductores y la carcasa, generalmente conectada a tierra, está dentro de ciertas circunstancias, sujeto a una diferencia de potencial igual al voltaje terminal de la máquina.

Para estar seguros de que existe suficiente aislamiento y que éste no ha sido dañado en el manejo, toda máquina nueva se somete a una prueba de perforación; por ejemplo según las normas de AIEE, se aplica por un minuto un potencial dos veces el normal más 1.000. Casi todas las normas prevén una aplicación del doble o más de la tensión de operación. (a veces hasta 4' o 5 veces ese valor).

En general las normas consideran todos los

casos que puedan presentarse, es decir: potencia nominal, tensión nominal, clase de máquina, utilización, etc., especificando la tensión de prueba, el tiempo, etc.

Pruebas sobre aceites aislantes:

Las pruebas de rigidez dieléctrica del aceite también está sujeta a una gran variedad de normas y recomendaciones. Sin ir muy lejos, la misma forma de los electrodos es diferente según el país: Americana, (electrodos en forma de cilindros de 1" de diámetro); Inglesa, (en forma de esferas de esferas); Alemana (en forma de hongos).

Los distintos comités reguladores de países europeos y americanos han diseñado diferentes métodos de ensayos. Aparte del hecho de que todos utilizan altos voltajes aplicados a una pequeña muestra en cierto tiempo, existen muy pocos factores en común en las distintas especificaciones. El hecho de desear una onda de tensión lo menos distorsionada posible también puede considerarse como un factor común en las normas.

Los factores variables como se han visto en el capítulo de ensayos son:

- Forma de los electrodos y espaciamiento.
- Número de muestras para ser probadas.
- Determinación del voltaje de ruptura.
- Tamaño y capacidad del transformador de prueba.
- Relación de crecimiento del voltaje en el tiempo.
- Determinación del promedio de rupturas.

2.- Medidas de buen funcionamiento:

Es conveniente describir en este capítulo de NORMAS, una serie de precauciones que deben tomarse pa-

ra el buen funcionamiento de ensayos en Alta Tensión, porque son aspectos generales, (estandarizados hasta cierto punto), que se efectúan en todo el mundo.

Estas prescripciones son utilizadas para la buena marcha de los ensayos desde un punto de vista técnico; para tener mayor precisión en las medidas; evitar interferencias con otras instalaciones (sistemas de comunicaciones, por ejemplo) y para el buen funcionamiento de los aparatos de ensayo.

) - Apantallamiento: (jaula de Faraday), (Scheening).

Los requerimientos impuestos para los ensayos de efecto "corona" es especial, y los otros ensayos en particular, deben ser cuidadosamente observados. Todo el local en que se realizan los experimentos debe estar "apantallado" o en otras palabras debe estar dentro de una jaula metálica llamada "Jaula de Faraday". (Como se deduce de la teoría de la electrostática, si existe un campo eléctrico en el interior de una caja metálica o simplemente conductora, éste queda confinado al interior y su intensidad afuera es nula). El cielorazo, las paredes y el piso, deberán estar forrados de una red o malla metálica, (hierro o cobre), con todas sus partes soldadas cuidadosamente formando parte de la tierra de la instalación. El objeto de esto es triple: a) aumentar la capacidad de tierra con el objeto de que no haya influencias de campos extraños en las instalaciones de medida; b) evitar que las oscilaciones de alta frecuencia que se producen con las chispas y descargas de impulso salgan al exterior afectando otras instalaciones; y c) Establecer un camino de retorno a las corrientes producidas por la alta tensión. (los efectos que también tiene esto para la seguridad del personal se discutirá más tarde).

Entra también como parte de las normas a seguirse, el tener el mayor número de accesos posibles a la red de tierra, para evitar que las conexiones de los aparatos propios del equipo sean muy largas y se produzcan caídas de tensión molestas para los ensayos.

El apantallamiento se debe extender también a todos los conductores utilizados en los ensayos. Se deben utilizar cables con cubierta coaxial conectada a tierra para las uniones entre los divisores de tensión y los aparatos de medida; para las alimentaciones de baja tensión, etc., con su pantalla conectada a la misma tierra de la Jaula de Faraday. Todas las estructuras metálicas que entran o salen también deben ser conectadas a la jaula. Todo esto para evitar que se produzcan campos eléctricos exteriores por inducción o contacto, que interfieren en las conexiones que se realizan.

- Separación de elementos conductores:

Normalmente se considera que ningún conductor o cuerpo con superficie conductora, (excepto los elementos de soporte), debe estar más cerca de las esferas es-pinterométricas o de todos los elementos que tengan alta tensión con respecto a tierra, que la distancia dada por la siguiente expresión:

$$\left(0.25 + \frac{\hat{U}}{300} \right) \quad (\text{metros})$$

Donde \hat{U} es el voltaje de cresta en kilovoltios que debe ser medido o que circula por los conductores. Esto tiene particular importancia y debe observarse cuidadosamente si se ensaya conductores y si hay descargas entre ellos, o si la distancia entre las esferas sobrepasa a un 75% del diámetro.

3.- Medidas de seguridad:

Existen también una serie de normas que tienen que observarse para la seguridad del personal que trabaja en una instalación de ensayos con Alta Tensión.

Dada su gran importancia, ya que se trata de cuidar la vida de las personas, se ha preferido tratarlas en un capítulo aparte que viene a continuación de éste.

Ooooooooooooooooooooooooooooooooooooo

CAPITULO VI

Los peligros de la Alta Tensión y las medidas de seguridad.

Generalidades.

El cuerpo humano es un conductor, por tanto está expuesto a los peligros que representa la conducción de la electricidad. Una pregunta corriente del profano es la siguiente: ¿Es la tensión o la corriente lo que causa la muerte de una persona?. Naturalmente que "la corriente" es la respuesta correcta; pero, sin tensión no hay corriente?. Por otro lado es sabido que tensiones relativamente altas pueden ser inofensivas, mientras tensiones bajas pueden resultar, a veces, fatales. Esto se explica con la intervención de un tercer factor que es determinante en este aspecto: la "impedancia" o "resistencia" al paso de la corriente.

Al fin, es la ley de Ohm la que explica las circunstancias de un accidente eléctrico. Regresando a la pregunta inicial, se puede concluir que tensión y corriente están entre sí en una relación de causa y efecto; y el efecto depende, no sólo de la tensión, sino también de la "resistencia", como se ha demostrado en un gran número de percances ocurridos con tensiones bajas. (por ejemplo empleando planchas eléctricas en locales húmedos; o por contacto con artefactos eléctricos de personas sumergidas en agua; o durante trabajos de obreros con herramientas eléctricas portátiles como perforadoras, taladros, soldadoras en el interior de galerías, tuberías metálicas, calderas, etc.).

En base a un gran número de datos estadísticos y de investigaciones, resulta que una corriente de pocos miliamperios a través del cuerpo humano empieza a ser pe-

ligrosa. Unos 20 -30 ma. representa ya un grave peligro. Es seguramente mortal una corriente de 0,1 amperios. Mucho depende del estado físico y síquico del individuo. Seguramente la causa de la muerte radica en el corazón, sometido por el paso de la corriente a una intensa e irregular vibración de los ventrículos que lo agota y provoca su paro. El efecto es distinto según el tipo de corriente: continúa y alterna de baja o alta frecuencia.

Para la seguridad de las personas sería deseable utilizar la energía con tensiones pequeñas. Como esto no es económicamente factible, ya que para ciertas aplicaciones es indispensable usar altas y altísimas tensiones, hay que adoptar otros sistemas de protección.

Las medidas de protección para prevenir los infortunios de carácter eléctrico son de suma importancia en todas las instalaciones. Tanto más cuidado requiere la instalación cuanto más alto el voltaje de trabajo.

Con mayor razón, el problema de la seguridad adquiere importancia capital, cuando se trata de laboratorios de Alta Tensión, sobre todo si están instalados en escuelas donde hay que trabajar con estudiantes que obviamente no tienen experiencia.

Aquí necesitan dispositivos adicionales de seguridad, primero para suplir la inexperiencia de los alumnos y segundo para proteger a más de la vida humana, equipo muy costoso.

En observancia a la ley de Ohm, que como hemos visto rige también en estos casos, los dos métodos fundamentales de defensa son:

- 1.- Aislamiento.
- 2.- Puesta a tierra.

En ambos casos el objeto es evitar el paso de una corriente peligrosa a través del cuerpo humano. A los

límites, (condiciones ideales), el aislamiento reduce a cero la corriente y la puesta a tierra reduce a cero la tensión.

1.- Aislamiento:

Se entiende en dos sentidos: aislamiento "físico", (de separación) y aislamiento "óhmico". En el primer caso se trata de aislar la parte viva, bajo tensión, del personal; mediante separadores, redes, puertas, jaulas, etc., eliminando toda posibilidad de contacto accidental con las estructuras que tienen voltaje.

En el segundo caso se trata de aislar "óhmica-mente" la instalación del personal. Se consigue con el empleo de gran calidad y de adecuado espesor para contener la corriente límite admisible (corriente de fuga), a un mínimo de 1 mA. Para el personal la protección adicional está constituida por varias medidas, como el empleo de pisos aislantes, zapatos especiales, herramientas revestidas de aislante, etc.

En caso de contacto accidental de una persona con una conexión de Alta Tensión que alimenta a unas esferas sería:

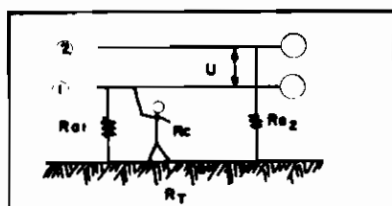


Fig. VI-1

- U : tensión entre los conductores 1 y 2
- R_{a1} R_{a2} : Resistencias de aislamiento de 1 y 2 hacia tierra.
- R_c : Resistencia del cuerpo humano.
- R_t : Resistencia del recorrido en la tierra.

El esquema equivalente sería

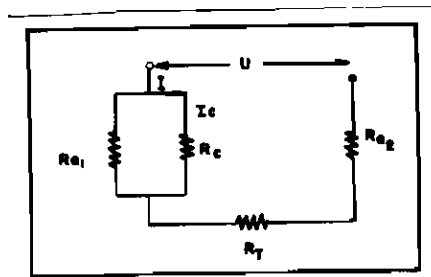


Fig. VI-2

en el que tenemos:

$$I = \frac{U}{\frac{R_{a1} \cdot R_c}{R_{a1} + R_c} + R_t + R_{a2}}$$

$$I_c = I \cdot \frac{R_{a1}}{R_{a1} + R_c} = \frac{U}{\frac{R_{a1} \cdot R_c}{R_{a1} + R_c} + R_t + R_{a2}} \cdot \frac{R_{a1}}{R_{a1} + R_c}$$

Si tenemos una tensión de 20 kV., para no superar una corriente de 1mA. por el cuerpo humano, (en caso de contacto accidental en las condiciones más desfavorables, es decir \$R_c\$ y \$R_t\$ iguales a cero), la resistencia de aislamiento mínima de cada hilo hacia tierra deberá resultar de 20 megaóhmios.

Otra medida es la adopción de transformadores de aislamiento, con relación 1:1. Como por ejemplo en el caso del pupitre de mando, control y medida de los laboratorios de Alta Tensión. El objeto es separar la red de distribución de baja tensión, (general del edificio) de los peligros en caso de falla del aislamiento entre alta tensión y pupitre de mando.

2.- Puesta a tierra.

Todas las partes y estructuras metálicas de las instalaciones eléctricas como carcasas de generador-

res y motores, cubas de transformadores, envolturas de equipo en general, soportes transmisión, tableros de distribución, etc., que en condiciones normales no llevan tensión pero en caso de falla de aislamiento podrían encontrarse bajo voltaje, tienen que ser conectados permanentemente a tierra.

La puesta a tierra representa un medio para eliminar tensiones de contacto peligrosas. En el ejemplo indicado en la figura, si no hay puesta a tierra,

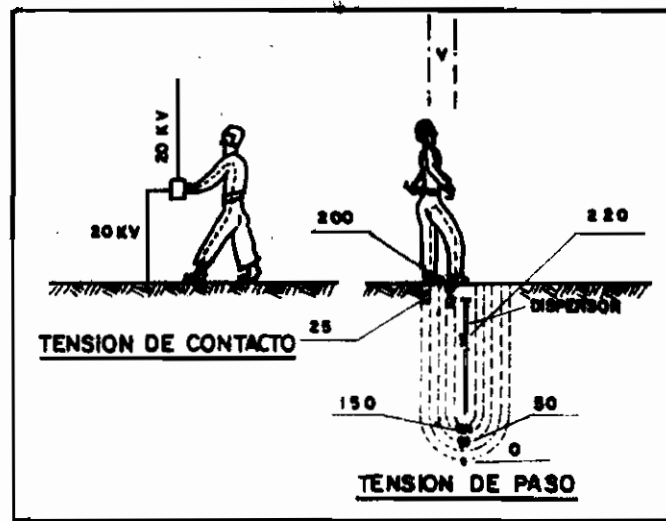
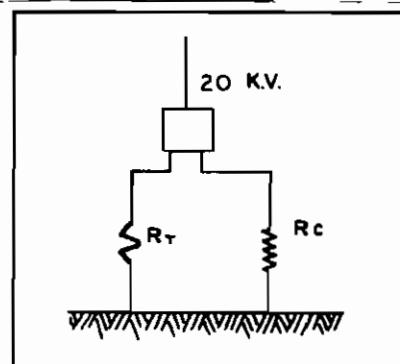


Fig. VI-3

en caso de falla de aislamiento, la tensión de contacto alcanza la tensión total del trabajo, es decir 20 KV lo que tiene efectos mortales para la persona. Mientras que con la puesta a tierra, como se ve en el diagrama equivalente, (abajo), la tensión de contacto re-



sultaría reducida a un valor pequeño, es decir la corriente se desvía por la conexión a tierra.

La corriente en el cuerpo humano resultaría:

$$I_c = \frac{V_c}{R_c} = \frac{R_t}{R_t + R_c} \cdot I_f$$

de aquí se ve que I_c es tanto más pequeña cuanto menor es la resistencia del dispersor R_t y cuanto menor es la resistencia del cuerpo R_c . La resistencia de tierra actúa como un "shunt" desviando al suelo las corrientes peligrosas.

En instalaciones con fuertes corrientes de descarga, (por ejemplo subestaciones con pararrayos), hay que tomar en cuenta la llamada "tensión de paso", que como se indica en figuras anteriores representa el voltaje entre los pies de una persona que se encuentra caminando cerca del dispersor de tierra. En este caso para eliminar todo peligro, es además necesario hacer un recinto de protección alrededor del dispersor.

Muchas veces ofrece dificultades el alcanzar una baja resistencia de tierra. Esto es una función de la resistencia específica del suelo, (pantanosos, arcillosos, arenosos, etc.) y de las dimensiones geométricas del electrodo de toma de tierra o dispersor. Los dispersores son generalmente electrodos de profundidad. Se tratan de tubos de cobre de gran longitud o a veces planchas rectangulares de hierro bastante grandes que se entierran en el suelo a varios metros de la superficie.

Las normas para instalaciones especiales, como de altísima tensión, son muy estrictas. Se requiere un valor muy bajo de resistencia, inferior a los 10 o 20 óhms. que prescriben las normas para las instalacio-

nes usuales de tensiones inferiores y superiores a los mil voltios. Por ejemplo en el laboratorio de la Escuela Politécnica de Quito, el valor de la resistencia a tierra ha sido reducido a 1,5 ohmios, por las elevadas tensiones que se utilizan. Este resultado se ha obtenido con tres tubos de cobre de 5 cm. de diámetro y 6 metros de largo conectados entre sí con platinas de cobre, enterrados hasta 7 metros de profundidad en paralelo con otros cinco dispersores tipo "copperweld" de 5/8" y de 6' de largo. Todo este sistema está eléctricamente unido a una amplia malla rectangular, (4 x 5 m), de hierro grueso puesto horizontalmente a 1 metro de profundidad en el suelo bajo el equipo de Alta Tensión. A este sistema de tierra está conectada, además, la jaula de Faraday.

Para la seguridad y el buen funcionamiento hay que tomar en cuenta no solamente el voltaje sino la energía de descarga. En el caso de super-laboratorios el caso de puesta a tierra resulta de una complejidad y costo enormes. Citamos, por ejemplo, la puesta a tierra del moderno Instituto de Alta Tensión de la Escuela de Ingeniería de ^{Munich} ~~Munich~~ (Alemania), donde se han enterrado hasta el agua del subsuelo, 35 tubos de cobre de 10 m. de largo interconectados con una red malla de cobre, logrando 0,3 ohmios de resistencia.

Dispositivos de seguridad adicionales.

En los laboratorios de alta tensión, tratándose de los máximos límites de voltaje generados hoy día, (hasta varios millones de voltios), además de las prescripciones fundamentales de aislamiento y de la puesta a tierra, se requieren una serie de medidas adicionales de protección que generalmente son las siguientes:

- 1.- Puerta de seguridad.
- 2.- Interruptor automático de puesta a tierra.

3.- Conexiones móviles a tierra.

4.- Señales acústicas, ópticas (lámparas), cerraduras de seguridad, etc.

1.- La puerta de seguridad incorporada a la jaula de alta tensión, tiene incorporada un seccionador o el contacto de un relay que actúa la conexión y la desconexión total de la alimentación a toda la instalación de alta tensión. Para dar tensión y hacer ensayos es preciso cerrar la puerta; por otro lado la apertura de la puerta abre el circuito quitando toda tensión, luego cualquier peligro.

2.- El interruptor automático de tierra sirve para descargar condensadores eliminando tensiones residuales peligrosas después de cada ensayo. Está generalmente constituido por una varilla metálica que cierra automáticamente en cortocircuito al condensador, descargando a tierra su energía almacenada. Está montada en paralelo al condensador, (que puede ser de carga, de medida, etc. según el objeto del ensayo); esta varilla metálica es atraída durante el trabajo normal por la acción electromagnética de una corriente desde el pupitre de mando; es expulsada hacia afuera por la acción de la gravedad cuando falta la corriente, (lo que sucede al término del ensayo, al presar el botón de alarma, o abriendo equivocadamente la puerta de ingreso).

3.- Conexiones móviles a tierra; en las instalaciones de prueba, se requieren, por razones de seguridad además de las conexiones a tierra fijas, unas conexiones móviles o temporales. Por ejemplo durante trabajos de reparación o revisión en el interior de la jaula es prudente conectar a tierra los terminales del transformador elevador.

4.- La llave de seguridad, avisos, alarmas, señales acústicas y ópticas, etc., son otros pequeños pero

importantes dispositivos que contribuyen a la seguridad y prevención de infortunios a las personas y daños a los equipos.

0-----0



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

L I B R O S

01.- Impulse Voltage Testing

W.G. Hawley (M I E E)

Chapman and Hall LTD.

London - 1959

02.- La Escuela del Técnico Electricista

Técnica de la Alta Tensión

Ing. Hans von Beeren

Edit. Labor.

Madrid - 1961

03.- Einführung in die Hochspannungstechnik

M. Wellauer

Verlag Birkhäuser. Basel/Stuttgart

Suiza - 1954.

04.- Leitfaden der Elektrotechnik

Moeller

Elektrische Energietechnik T-5

Ing. Hasso Leiste

Viena - Austria - 1963

05.- L'équipement des laboratoires á haute tension

HAEFELY & Cie.

Suisse.

06.- Standard Handbook for Electrical Engineers

Archer E. Knowlton, Editor in chief

Mc. Graw-Hill Book Company, Inc.

Tokio

9o. Edición

Kōgakusho Company, LTD.

07 - Elements' of Power System Analysis.

William D. Stevenson Jr.

Mc- Graw-Hill Book Company

Second Edition

Kōgakusha Company LTD

Tokio - 1962.

08.- Introduction to Electrical Engineering.

George V. Mueller

Third Edition

Mc- Graw-Hill Book Company Inc.

New York - 1957.

09.- Einführung id die Hochspannungstechnik

Von Dr. Ing. Eugen Flegler.

Verlag G. Braun. Karlsruhe.

1964.

10.- Lehrbuch der

Hochspannungstechnik

Dr. Ig. Guntram Lesch

Springer - Verlag.

Berlin/Göttingen/Heidelberg

1959.

11.- Introduction to Electric Fields

Walter E. Rogers.

New York - Toronto - London.

Mc Graw-Hill Book Company, Inc.

1954.

12.- Principles of Electric and Magnetic Fields.

Second Edition

Warren B. Boast, Ph.D.

Harper and Brothers.

New York - 1956.

13.- Hochspannung und Hochleistung

Joseph Biermanns

Carle Hanser Verlag

Munich - 1949.

14.- Electrotecnia General y Aplicada

IV Técnica de las medidas eléctricas.

Moeller - Werr; Dr. Ing. Melchior Stöckl

Editorial Labor S.A.

Barcelona - España.

1964.

15.- Hochspannungs Praktikum

Erwin Marx

Springer - Verlag

Berlin. Göttingen/Heidelberg.

1952.

16.- Materiales Electrotécnicos Modernos

René Laurent

Edit. Gustavo Gili S.A.

Barcelona - 1952.

17.- Les Phénomènes de Choc dans les Machines Electriques.

B. Heller.

A. Veverka

Dunod.

Paris - 1963.

18.- Prove e difetti delle macchine e delle Apparecchiature Elettriche.

Ing. Vittorio Mòdoni.

Casa Editrice Prof. Riccardo Pátron.

Bologna - Italia

1957.

19.- Misure Elettriche

V. Mòdoni

G.P. Dore

Casa Editrice Prof. Riccardo Pátron.

Bologna - Italia.

1965.

20.- Electrical Transmission and Distribution Reference Book Central Station Engineers of the Westinghouse Electric Corporation.

4a. Edición - 2a. impresión

Pittsburgh, USA

1950.

R E V I S T A S

21.- Brown Boveri Review.

750 KV. Systems.

Vol. 51.

No. 1/2.

Enero - Febrero - 1964.

Suiza.

22.- Electrical Times

"U.S.S.R. 1,500 KV. d.c. line"

12 August - 1965.

23.- High Voltage Power Transmission

L.O. Barthold and H.G. Pfeiffer.

Scientific American

May - 1964

Pages - 39-47

BOLLETINES INFORMATIVOS E INSTRUCCIONES DE SERVICIO

24.- Cathode-ray Oscillograph Mod. 75.

Emil HAEFELY & Cie. AG Basel

Suisse - 1961

25.- Stossspannungs - Messeirichtung.

STM 613

Messwandler - Bau GMBH Bamberg

1956.

26.- Scheitelspannungs - und Effektivwert - Messeinrichtung.

SEM 612

Messwandler - Bau GMBH Bamberg.

1964.

27.- Test Transformers and Control Equipment.

ASEA

Suecia - 1964.

28.- Equipment for Technical and Scientific Education

Ferranti Transformers Ltd.

England

1962 1964.
