

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA**

***FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA***



***“ANÁLISIS Y RECOMENDACIONES PARA LAS  
REPARACIONES DE LOS GENERADORES  
SÍNCRONOS DE ALTA TENSIÓN”***

**INFORME DE INGENIERÍA**

**PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:**

**INGENIERO ELECTRICISTA**

**PRESENTADO POR:**

***WILFREDO CIRO MENDOZA SANABRIA***

***PROMOCIÓN 1985 – II***

**LIMA – PERU**

**2002**

A mis Hijos que son el motivo de mi superación, a mi Esposa por su constante apoyo, a mi Madre por su amor eterno, y a mi Padre por su apoyo.

**ANÁLISIS Y RECOMENDACIONES PARA LAS  
REPARACIONES DE LOS GENERADORES  
SÍNCRONOS DE ALTA TENSIÓN**

# INDICE

**PROLOGO**

**PAGINA 1**

## **CAPITULO I**

### **GENERALIDADES**

#### **1.1 MEMORIA DESCRIPTIVA**

**3**

##### **1.1.1 Ubicación**

**3**

##### **1.1.2 Antecedentes**

**4**

##### **1.2.3 Alcances**

**4**

##### **1.2.4 Objetivo**

**4**

#### **1.2 EVOLUCIÓN DE LOS GENERADORES SÍNCRONOS**

**5**

#### **1.3 MERCADO ACTUAL PARA LA REPARACIÓN DE**

**6**

#### **LOS GENERADORES SÍNCRONOS**

## **CAPITULO II**

### **ANÁLISIS DEL CAMPO ELÉCTRICO EN EL GENERADOR SÍNCRONO DE ALTA TENSIÓN**

<b>2.1 FUNDAMENTO TEÓRICO</b>	<b>9</b>
2.1.1 Nomenclatura	9
2.1.2 Conceptos	10
<b>2.2 CALCULO DEL CAMPO ELÉCTRICO</b>	<b>11</b>
2.2.1 Planteamiento del problema	12
2.2.2 Calculo cuantitativo del campo eléctrico	14

## **CAPITULO III**

### **MATERIALES DIELECTRICOS**

<b>3.1 DIELECTRICOS</b>	<b>24</b>
3.1.1 Fundamento Teórico	24
3.1.2 Propiedades de los dieléctricos	28
<b>3.2 MATERIALES DE ULTIMA GENERACIÓN</b>	<b>51</b>
3.2.1 Kapton	52
3.2.2 Nomex	56
3.2.3 Micaglass 2596	59
3.2.4 Barniz graduante de tensión	60
3.2.5 Calmicaglass	63

## **CAPITULO IV**

### **RECOMENDACIONES Y FACTORES CRÍTICOS A CONSIDERAR EN LA REPARACIÓN DE UN GENERADOR SÍNCRONO EN ALTA TENSIÓN**

<b>4.1 GENERALIDADES</b>	<b>66</b>
<b>4.2 MÉTODOS DE SUPRESIÓN DEL EFECTO CORONA</b>	<b>67</b>
4.2.1 Barra desnuda.	67
4.2.2 Ranura del estator.	70
4.2.3 Extremo del codo de la bobina.	73

## **CAPITULO V**

### **PRUEBAS ELÉCTRICAS**

<b>5.1 PRUEBA DE AISLAMIENTO</b>	<b>95</b>
5.1.1 Pruebas D.C.	95
5.1.2 Pruebas A.C.	107
5.1.3 Pruebas de Capacitancia y Factor de Disipación	114
5.1.4 Medición de Capacitancia y Factor de Disipación	123
<b>5.2 PRUEBAS DE CARACTERÍSTICAS DEL GENERADOR SÍNCRONO</b>	<b>128</b>
<b>5.3 MEDICIÓN DE PARÁMETROS</b>	<b>131</b>

**CAPITULO VI****APLICACIÓN: REPARACIÓN DEL GENERADOR  
SÍNCRONO DE LA UNIDAD N°2 UBICADA EN LA  
CENTRAL HIDROELÉCTRICA YAUPI**

<b>6.1 CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DE LA UNIDAD N°2</b>	<b>134</b>
6.1.1 Datos técnicos	134
6.1.2 Planeamiento del programa de ejecución de la reparación parcial del generador síncrono.	137
<b>6.2 PRUEBAS ELÉCTRICAS.</b>	<b>140</b>
6.2.1 Equipos e instrumentos de utilizados	140
6.2.2 Pruebas de aislamiento.	140
6.2.3 Pruebas de características del generador síncrono.	145
6.2.4 Pruebas de parámetros del generador	152
<b>CONCLUSIONES</b>	<b>153</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	<b>157</b>

## PROLOGO

El presente trabajo por experiencia profesional trata sobre las recomendaciones y cuidados que se deberían tener en una reparación del sistema de aislamiento del estator de un generador síncrono de alta tensión, el nivel del manejo de estas recomendaciones y cuidados recae en el personal técnico que ejecutan estas reparaciones y que a decir verdad no tienen las herramientas necesarias del conocimiento para comprender efectivamente el esfuerzo eléctrico que se originan en el sistema de aislamiento, las causas de la intensificación de estos esfuerzos, los métodos para suprimir estos esfuerzos, entre otros.

Para delinear estas recomendaciones y cuidados en las reparaciones del sistema de aislamiento de un generador síncrono de alta tensión, ha sido necesario recurrir a la base teórica científica de la formación de campos eléctricos y de los dieléctricos, para analizar, adecuarlo a esta aplicación particular y dar una explicación racional, ordenada, coherente y sobre todo verificable en los hechos.

El presente estudio tuvo su aplicación practica en un generador de gran potencia en alta tensión, en la Central Hidroeléctrica de Yaupi.

El capítulo I, comprende la ubicación, los antecedentes, alcance y objetivo del presente estudio, evolución de los generadores síncronos y el mercado actual para la reparación de los generadores síncronos.



El capítulo II, comprende el análisis y cálculo del campo eléctrico en el dieléctrico de la ranura del estator de un generador síncrono de alta tensión, cuya solución analítica no existe o es muy complicado, para lo cual tuvimos que recurrir a los nuevos métodos de cálculos computacionales y que por la configuración geométrica escogimos el método de simulación de cargas lineales.

El capítulo III, estudia a los dieléctricos sobre la base de teoría de bandas, y damos una descripción de sus principales propiedades, así como también de los factores que afectan estas propiedades, para luego explicar los materiales aislantes de última generación obtenidos por nuevas técnicas.

En el capítulo IV, explicamos los factores críticos y el lugar donde se presentan estos en las bobinas de alta tensión para luego dar las recomendaciones y métodos de supresión de estos.

El capítulo V, se refiere a las diferentes pruebas eléctricas que se deberán efectuar al sistema de aislamiento del estator de un generador síncrono de alta tensión, cuando se logra concluir esta reparación, luego analizamos las diferentes pruebas D.C., pruebas A.C. y pruebas de capacidad y pérdidas dieléctricas como también las pruebas de características del generador.

El capítulo VI, es una aplicación del presente estudio, de la reparación en el sistema de aislamiento de un generador síncrono de alta tensión de la unidad N° 2 en la Central Hidroeléctrica de Yaupi.

Finalmente se presentan las conclusiones encontradas en el desarrollo del presente estudio y su respectiva aplicación.

## **CAPITULO I GENERALIDADES**

### **1.1 Memoria Descriptiva**

#### **1.1.1 Ubicación**

El presente trabajo se realizó en la Central Hidroeléctrica de Yaupi, propiedad de la empresa Electroandes S.A., y esta ubicada a 350 kilómetros de la ciudad de Lima aproximadamente con 260 kilómetros de carretera asfaltada y 90 kilómetros de carretera afirmada.

Esta central hidroeléctrica tiene una potencia instalada de 120 MVA, cuenta con 5 generadores de 24 MVA. , 13.8 kV., 1004 A., 450 RPM., de los cuales, las tres primeras unidades fueron instaladas en la primera etapa el año 1957 y las dos ultimas unidades se instalaron en la segunda etapa el año 1967.

#### **1.1.2 Antecedentes**

En abril de 1983 el generador de la unidad N°5 fallo por primera vez, originado básicamente por un mal montaje en fabrica de una de las bobinas del estator; en Octubre de 1991 volvió a fallar pero en esta ocasión por deterioro del aislamiento provocado por defectos en la instalación de bobinas en la reparación efectuada en 1983. En esta oportunidad dada la situación de inexperiencia en este tipo de trabajos, la reparación tuvo que efectuarse hasta en dos oportunidades en un tiempo de 10 meses con 10 días.

El 01 de diciembre de 1991 la unidad de generación N° 2 salió de servicio por tercera vez; en las tres ocasiones por actuación del relé neutro (64N), como consecuencia de ello la unidad quedó fuera de servicio durante los días 02,03,04 del mismo mes para su inspección y pruebas.

El Día 18 de Noviembre de 1999 salió de servicio la Unidad N°2 en cuyo reporte se aviso que actúo el relé de tierra (64N) del generador, se procedió al chequeo visual de las bobinas estáticas del generador y se pudo observar una perforación eléctrica en el extremo de codo de una bobina estática de la fase B.

### **1.1.3 Alcance**

Debido a los antecedentes se ha podido observar que la mayor causa de falla de los generadores síncronos de alta tensión de la presente central hidroeléctrica es debido a la degradación del aislamiento eléctrico en las bobinas del estator es por esta razón que el presente trabajo se centrara únicamente en el estudio del fenómeno de esfuerzo eléctrico en las bobinas de alta tensión.

### **1.1.4 Objetivo**

Debido a la alta especialización del personal que demanda la presente reparación y dado que este tipo de trabajos no es muy frecuente o en todo caso es realizado por personal de empresas fabricantes de bobinas de alta tensión que mayormente son extranjeras, originándose una escasa oferta de personal técnico nacional para la realización de estos trabajos.

El presente estudio tendrá como objetivo principal entender los fenómenos de esfuerzo eléctrico que ocurren en una bobina estática de un generador síncrono de potencia en alta tensión, y esta dirigido al personal

técnico que ejecutara este tipo de trabajos, para luego establecer recomendaciones y cuidados que se deberán tener en cuenta para las reparaciones futuras del generador mencionado.

## **1.2 Evolución de los Generadores Síncronos**

La evolución de las maquinas eléctricas se debió principalmente al incremento exponencial de la demanda de la energía eléctrica en el mundo, antes de este crecimiento se requería de maquinas eléctricas de dimensiones grandes y de potencias del orden de los 1000 a 5000 KVA, en cuyos diseños no existían mayores complicaciones porque los niveles de tensión, temperatura, estaban por los niveles fácilmente controlables, como por ejemplo la selección de los aislamientos para uno u otro dispositivo eléctricos era bastante simple y se encontraba en las materias de origen natural madera, fibras de algodón, y otros vegetales, seda, aceites vegetales, caucho natural, y resinas naturales.

Dada la situación creciente de la demanda de energía eléctrica se requería cada vez de maquinas eléctricas de mayor potencia o de maquinas eléctricas cuya potencia especificas, es decir, la potencia por unidad de volumen o por unidad de masa sean cada vez mayores, en consecuencia niveles de tensión de trabajo más altos, niveles de temperatura de trabajo mas alto.

Este crecimiento ha sido sustentado con el desarrollo de las tecnologías para la obtención de materiales aislantes que posean propiedades especiales, antes desconocidas que son obtenidas por técnicas síntesis químicas a veces muy complicadas, formación artificial de monocristales y aplicación de películas sobre distintos soportes y otros procesos.

Los bobinados clasificados en los niveles de Alta Tensión para generadores y motores de gran potencia, son bobinados diseñados para operación encima de los 7.5 kV. ; Los generadores accionados con turbinas de vapor son tal altos y están por los 26 kV. ; Los generadores accionados por turbinas hidráulicas están por los 16 kV.; así como los motores que están entre los 11 kV y 13.8 kV.

Entonces durante el último medio siglo, las máquinas eléctricas de gran potencia rotativas han sido diseñadas con voltajes cada vez más crecientes. Esta tendencia crea la necesidad de desarrollar un sistema sofisticado Control de Gradiente de Potencial para mantener las descargas corona en niveles aceptables. El Control de Gradiente de Potencial en el sentido más amplio puede ser considerado como cualquier proceso para bajar el nivel de esfuerzo de tensión en áreas de alta tensión para proporcionar un campo más uniforme.

El diseño de generadores y motores de poca potencia en operación de alto voltaje no es practicable, porque el espacio usado para el aislamiento en la ranura debe permitir también en este pequeño espacio al cobre, el resultado sería un antieconómico e ineficiente diseño, por consiguiente los bobinados de alta tensión en los generadores son de gran potencia y están por encima de los 8000 KVA.

### **1.3 Mercado actual para la reparación de los generadores síncronos**

Entre las Centrales de generación más importantes que existen en el país tenemos en la tabla 1.1, cuyos niveles de tensión más frecuentes son de 13.8 kV. y 10 kV.

<b>CENTRAL DE GENERACION</b>	<b>POTENCIA INSTALADA</b>	<b>TENSION</b>
Central Hidroeléctrica Mantaro	798 MW	13.8 kV
Central Hidroeléctrica Restitución	210 MW	13.8 kV
Central Hidroeléctrica Cañón del Pato	240 MW	13.8 kV
Central Hidroeléctrica Huinco	248 MW	12.5 kV
Central Hidroeléctrica Charcani V	150 MW	13.2 kV
Central Hidroeléctrica Chimay	150 MW	10 Kv
Central Hidroeléctrica Matucana	120 MW	12.5 kV
Central Hidroeléctrica San Gabán	110 MW	13.8 kV
Central Hidroeléctrica Yaupi	100 MW	13.8 kV
Central Hidroeléctrica Carhuaquero	90 MW	10 kV
Central Hidroeléctrica Callahuanca	71 MW	8 kV y 6.5 kV
Central Hidroeléctrica Moyopampa	60 MW	10 kV
Central Hidroeléctrica Yanango	40 MW	10 kV
Central Hidroeléctrica Mal Paso	44 MW	6.9 kV
Central Hidroeléctrica Cahua	40 MW	10 Kv
Central Hidroeléctrica Gallito Ciego	34 MW	10 kV
Central Hidroeléctrica Pachachaca	12 MW	2.3 Kv
Central Hidroeléctrica Aricota	23.8 MW	10.6 Kv

**Tabla 1.1 Principales Centrales Hidroeléctricas del Perú.**

<b>CENTRALES DE GENERACION</b>	<b>POTENCIA INSTALADA</b>	<b>TENSION</b>
Central Térmica Ventanilla	500 MW	16 y 13.8 kV
Central Térmica Santa Rosa Nueva	270 MW	13.8 kV
Central Térmica Ilo 2	270 MW	17 kV
Central Térmica Ilo 1	179 MW	13.8 kV
Central Térmica Aguaytia	160 MW	13.8 kV
Central Térmica Malacas	125 MW	13.8 kV
Central Térmica Mollendo	120 MW	13.8 kV
Central Térmica Chimbote 2	59 MW	13.8 kV
Central Térmica San Nicolás	53 MW	13.8 kV
Central Térmica Santa Rosa	40 MW	10 kV
Central Térmica Taparachi	39 MW	2.4 y 10.5 kV
Central Térmica Piura	33.76 MW	10 kV
Central Térmica Calana	25.6 MW	10.5 kV
Central Térmica Chiclayo	25 MW	10.5 kV
Central Térmica Cementos Norte Pacasmayo	22.5 MW	10 kV
Central Térmica Trujillo Sur	20 MW	10 kV
Central Térmica Tintaya BHP	19.52 MW	4.16 kV
Central Térmica Zorritos	18 MW	10 kV
Central Térmica Cerro Verde	15 MW	10 kV
Central Térmica Trupal	11 MW	10 kV
Central Térmica Paita	10.8 kV	4.16 y 10 kV
Central Térmica Sullana	10 MW	10 kV
Central Térmica Bellavista	7.85 MW	10 y 4.16 kV

**Tabla 1.2 Principales Centrales Térmicas del Perú.**

## **CAPITULO II**

### **ANÁLISIS DEL CAMPO ELÉCTRICO EN EL GENERADOR SÍNCRONO DE ALTA TENSIÓN**

#### **2.1 Fundamento teórico**

Para la comprensión integral del esfuerzo eléctrico a que es sometido el dieléctrico en la ranura del generador sincrónico es necesario calcular el campo eléctrico originado por el conductor de la parte activa de la bobina del estator. Los cálculos para hallar el campo eléctrico de cualquier distribución de carga para un determinado espacio, actualmente han sido mejorados y existen varios métodos para la solución de este problema clásico que nos plantea la electrostática.

**El Método Analítico**, es el más conocido, y cuya solución se hace posible para distribuciones de carga cuya forma geométrica son regulares y en muchos casos la solución se hace imposible formas irregulares.

**El Método de Simulación de Cargas (MSC)**, consiste en introducir discos cargados como cargas ficticias, por ejemplo para el cálculo de campo eléctrico originado por un electrodo toroidal doble para los aisladores de cadena en Extra Alta Tensión se usan la superposición de muchos anillos cargados.

**Método de Carga Superficial (MCS)**, es aplicado para calcular el campo eléctrico en sistemas de aislamiento complejos como en transformadores o



subestaciones de aislamiento de gas, este método es útil cuando existen en el sistema de aislamiento varios tipos de dieléctrico.

**Método de Elementos Finitos (MEF)**, Este método

consiste en resolver la ecuación diferencial del potencial electrostático por métodos numéricos utilizando programas computarizados.

A continuación describiremos las variables escalares y vectoriales que usaremos en el presente capítulo.

### 2.1.1 Nomenclatura

Fuerza electrostática	F
Campo Eléctrico	E
Potencial electrostático	$\Psi$
Flujo Eléctrico	$\phi$
Desplazamiento Eléctrico	D
Polarización	P
Susceptibilidad Eléctrica	$\chi$
Permitividad Eléctrica	$\epsilon$
Constante Dieléctrica	K

### 2.1.2 Conceptos

#### 2.1.2.1 Campo Eléctrico ( $\vec{E}$ )

El campo eléctrico en un punto es el límite de la razón entre la fuerza electrostática (  $F$  ) que actúa sobre una carga  $q$  colocada en el punto entre el valor de la carga, cuando este se aproxima a cero.

$$E(x,y,z) = \lim_{q \rightarrow 0} \frac{F(x,y,z)}{q}$$

E Campo Vectorial Conservativo

### 2.1.2.2 Potencial Electrostático ( $\Psi$ )

$$E = -\nabla\Psi$$

$\Psi$  Campo escalar

### 2.1.2.3 Líneas de Fuerza

Son curvas orientadas que representan gráficamente el campo eléctrico cuyas tangentes indican la dirección y sentido de E en ese punto, y cuya densidad de líneas por unidad de área representa el módulo de E.

### 2.1.2.4 Superficies Equipotenciales

Son aquellas superficies en las cuales el potencial electrostático y tiene el mismo valor, las líneas de fuerza son siempre perpendiculares a las superficies equipotenciales.

### 2.1.2.5 Ley de Gauss

$$\iint E \cdot da = \iiint \rho \frac{\Delta V}{\epsilon_0}$$

### 2.1.2.6 Ecuación de Poisson

$$\nabla^2 \Psi = \frac{-\rho}{\epsilon_0}$$

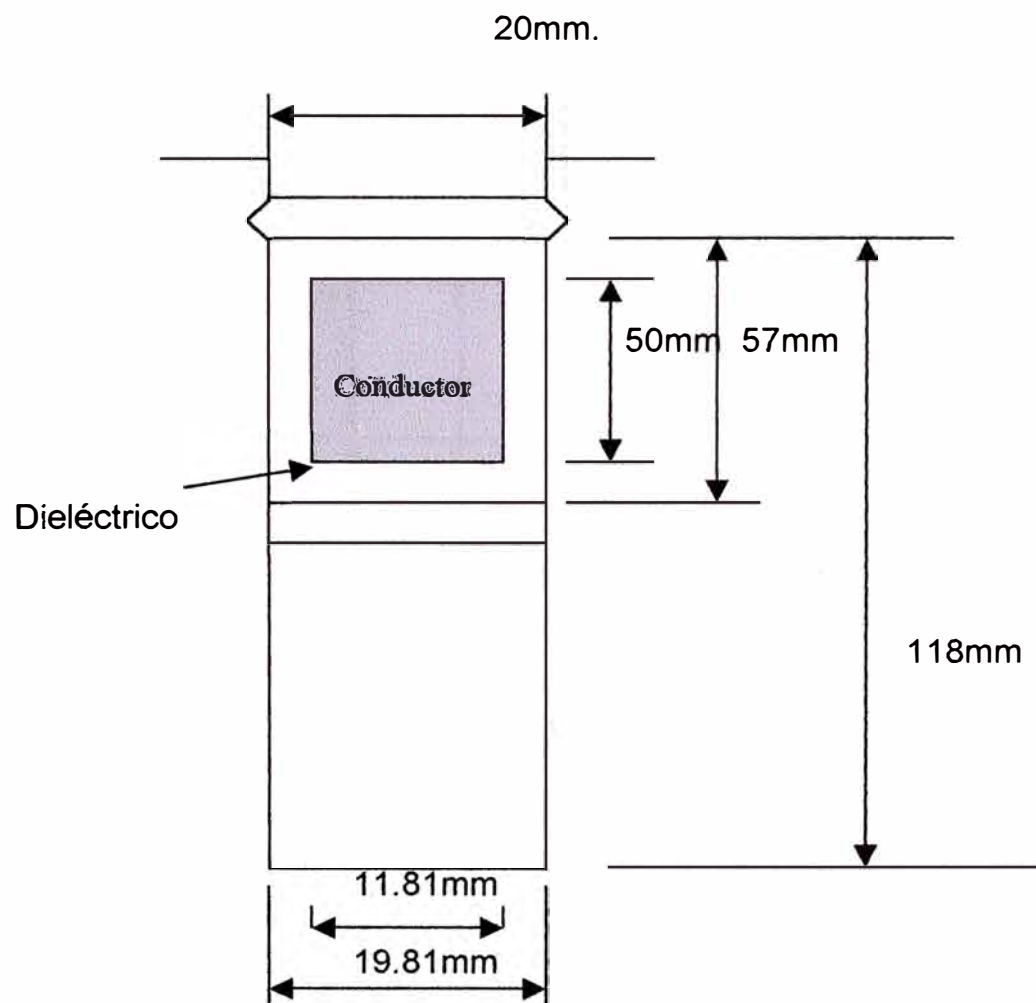
### 2.1.2.7 Ecuación de Laplace

$$\nabla^2 \Psi = 0$$

## 2.2 Cálculo del Campo Eléctrico

### 2.2.1 Planteamiento del Problema

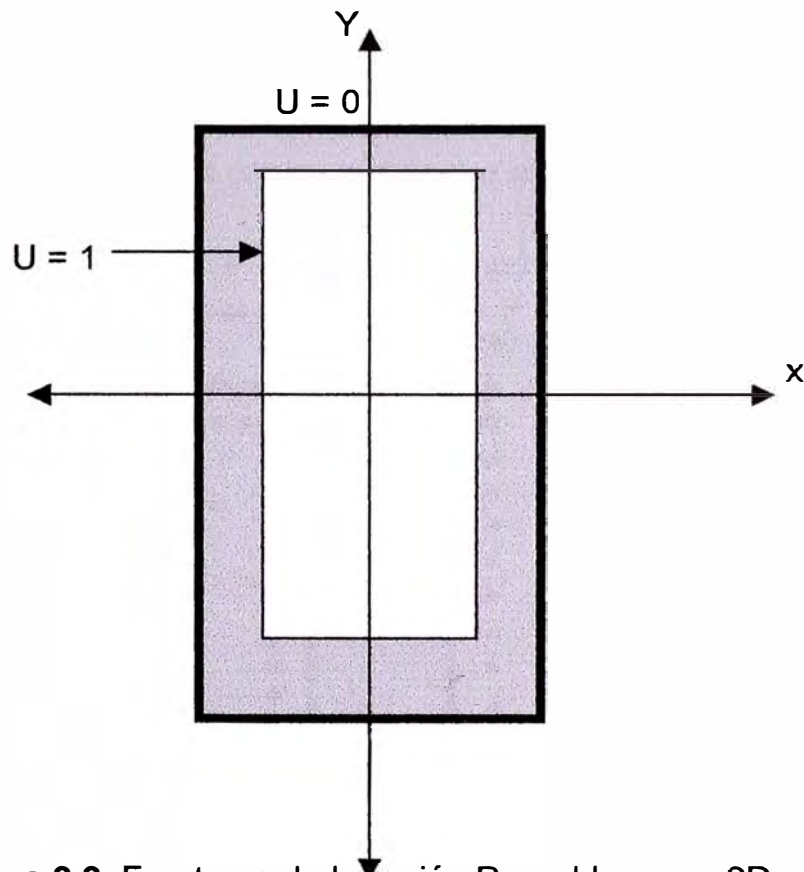
La figura 2.1 es el corte transversal de la parte activa de la bobina instalada en la ranura del núcleo del generador sincrónico.



**Figura 2.1** Vista Transversal de la bobina parte activa.

De acuerdo a la configuración geométrica de la carga y el dielectrico para esta situación particular donde conocemos el potencial  $\Psi(x,y,z)$ , en la superficie frontera de la region donde queremos calcular el campo electrico, facilmente podremos señalar que se trata de un PROBLEMA DIRICHLET.

La solución de la ecuación de Laplace para la region escogida se puede reducir, si consideramos como infinito la longitud de la parte activa de la bobina, porque esta longitud en relacion a las dimensiones de la ranura es muy grande, bajo esta consideracion nos encontramos frente a un problema de ecuación diferencial en derivadas parciales con dos variables.



**Figura 2.2** Fronteras de la región R problema en 2D.

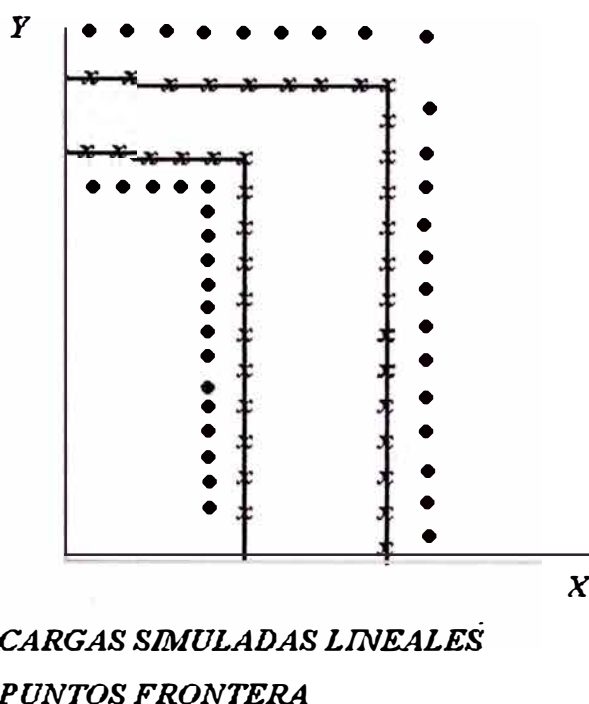
$$\frac{\partial^2 U}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial Y^2} = 0$$

## 2.2.2 Cálculo Cuantitativo del Campo Eléctrico

Una vez planteado el problema para el cálculo de campo eléctrico en la ranura de una bobina de alta tensión escogemos un método antes mencionado y observamos que el método de simulación de cargas lineales es el que más se adapta a este caso particular.

### 2.2.2.1 Método de Simulación de Carga Lineal

Para obtener las líneas equipotenciales y la distribución del campo eléctrico, por el Método de Simulación de Carga (MSC), considerando cargas tipo lineal de longitud infinita como se muestra en la siguiente figura 2.3. Así mismo, se consideran los puntos en la frontera donde el valor del potencial es conocido. Debido a la simetría del problema, se requiere hacer el análisis solamente en la cuarta parte como se muestra en la misma figura



**Figura 2.3.** Distribución de cargas lineales simuladas para la obtención de los potenciales

Aplicando el principio de superposición: se evalúa el potencial en cada punto frontera debido a todas las cargas, llegándose a un sistema de ecuaciones de la forma:

$$[P]\{Q\} = \{V\}$$

Donde P son los coeficientes de potencial, conocido para las cargas lineales. Resolviendo el sistema de ecuaciones se determina el valor de las cargas simuladas, invirtiendo la matriz:

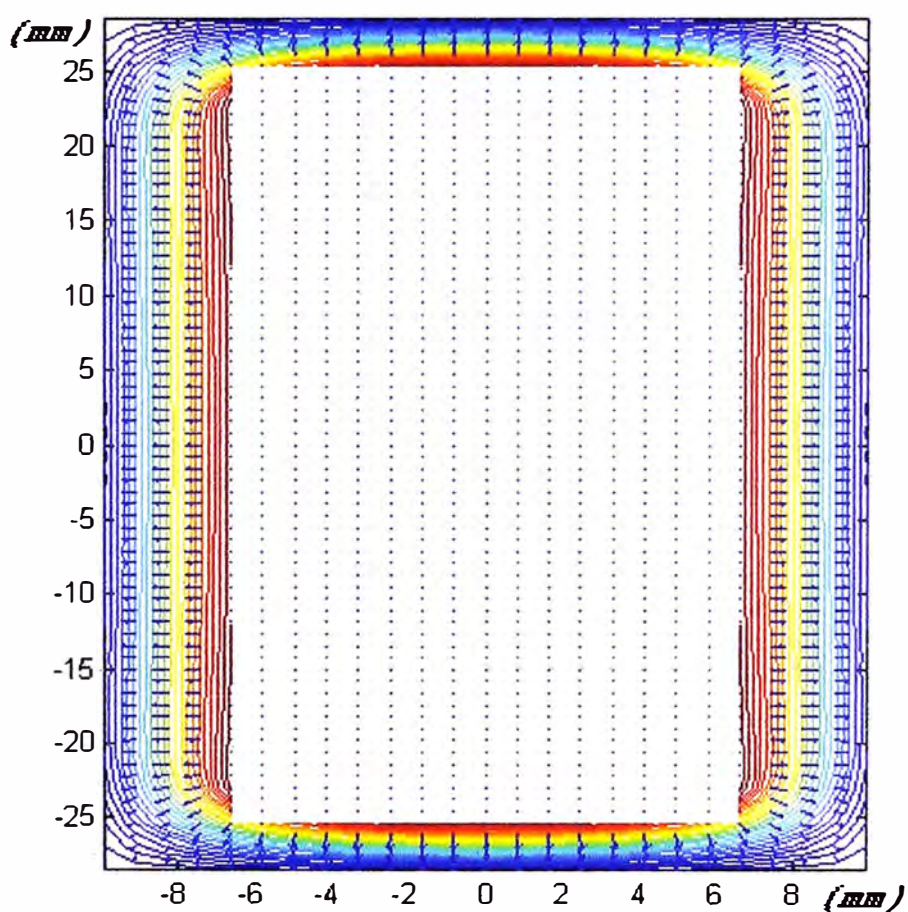
$$\{Q\} = [P]^{-1} \{V\}$$

Una vez determinado el valor numérico de las cargas simuladas, se determina el potencial que producen estas en otros puntos en la frontera para conocer la aproximación del método. Variando los parámetros número de carga y localización de las mismas puede llegarse a valores aceptables. El siguiente paso, es la determinación del campo eléctrico en diferentes puntos del espacio entre los conductores y su valor máximo con fines de diseño.

Se ha escrito un programa basado en el MSC en el ambiente de MATLAB para la determinación del valor del campo eléctrico. La simulación ha arrojado un error del 2.98 % cuando se ha utilizado un número total de 62 cargas simuladas y el valor del campo eléctrico máximo ha sido de  $E_{max}=0.6872$  pu / mm. El programa a la vez de arrojar los valores numéricos del potencial y campo eléctrico, gráfica las líneas equipotenciales y la dirección del campo eléctrico como se observa en la siguiente figura 2.4. Para

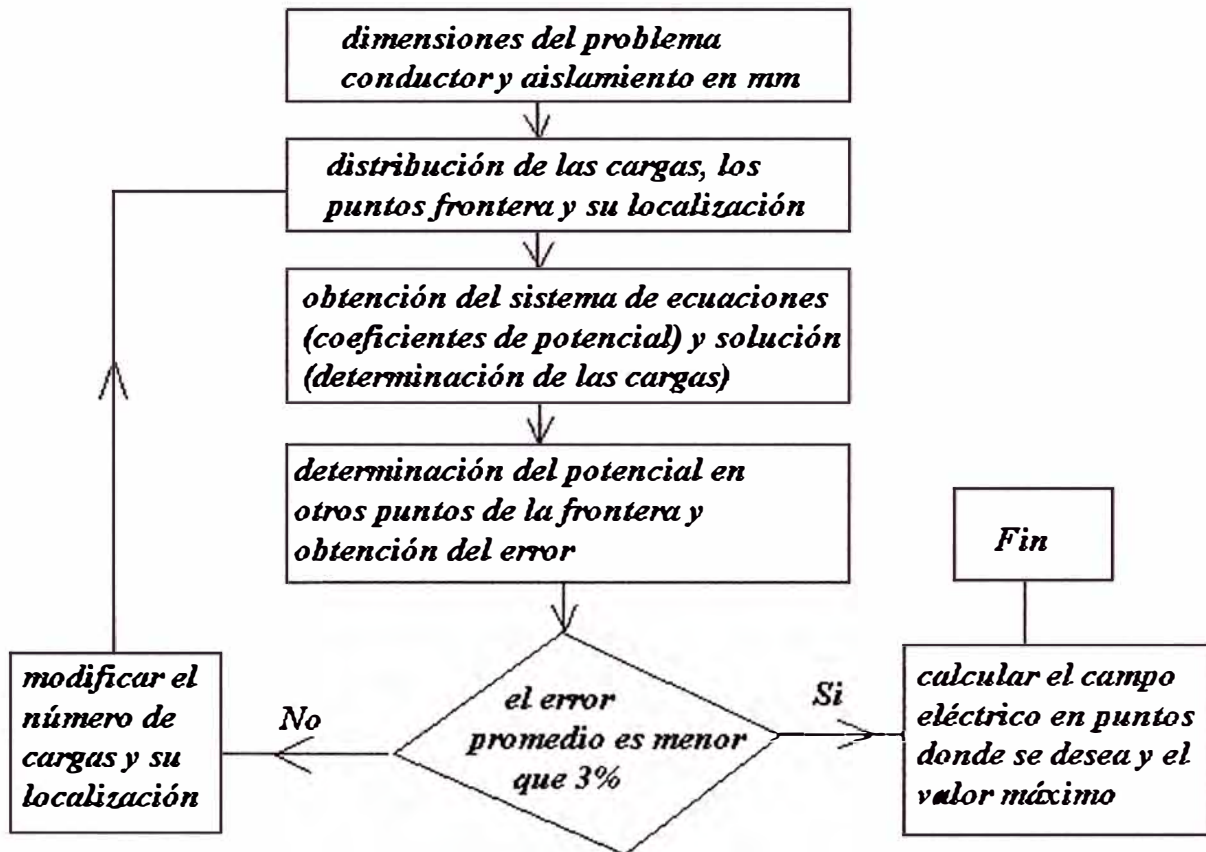
transformar el valor del campo eléctrico en kV, debemos multiplicar por 13.8 KV. Obteniendo el valor de  $E_{max}=9.4833$  kV/mm.

### 2.2.2.2 Gráfica de las curvas equipotenciales y líneas de fuerza del campo eléctrico



A continuación se muestra el diagrama de flujo 2.1 general del programa del MSC y el programa escrito en MATLAB

### DIAGRAMA DE FLUJO



#### 2.2.2.3 Diagrama de flujo del procedimiento para la programación

#### 2.2.2.4 Programa para el cálculo del campo eléctrico

% Programa del método de simulación de carga

xa=9.905; % en mm

ya=28.5; % en mm

xb=5.905; % en mm

yb=25; % en mm

% numero de cargas y distribucion

nax=10;

nay=16;



```
nbx=8;
nby=28;
da1=xa/nax;
da2=ya/nay;
db1=xb/nbx;
db2=yb/nby;
daxx=1.;
dayy=0.7;
dbxx=1.7;
dbyy=1.7;
% coordenadas
for i=1:nax
    xj(i)=(i-0.5)*da1;
    yj(i)=ya+dayy;
    xi(i)=xj(i);
    yi(i)=ya;
    xp(i)=i*da1;
    yp(i)=ya;
    v(i)=0;
end
for i=1:nay
    xj(i+nax)=xa+daxx;
    yj(i+nax)=(i-0.5)*da2;
    xi(i+nax)=xa;
```

```

yi(i+nax)=yj(i+nax);
xp(i+nax)=xa;
yp(i+nax)=i*da2;
v(i+nax)=0;
end
for i=1:nbx
xj(i+nax+nay)=(i-0.5)*db1;
yj(i+nax+nay)=yb-dbyy;
xi(i+nax+nay)=xj(i+nax+nay);
yi(i+nax+nay)=yb;
xp(i+nax+nay)=i*db1;
yp(i+nax+nay)=yb;
v(i+nax+nay)=1;
end
for i=1:nby
xj(i+nax+nay+nbx)=xb-dbxx;
yj(i+nax+nay+nbx)=(i-0.5)*db2;
xi(i+nax+nay+nbx)=xb;
yi(i+nax+nay+nbx)=yj(i+nax+nay+nbx);
xp(i+nax+nay+nbx)=xb;
yp(i+nax+nay+nbx)=i*db2;
v(i+nax+nay+nbx)=1;
end
% calculo de los coeficientes de potencial

```

```

for i=1:nax+nay+nbx+nby
for j=1:nax+nay+nbx+nby
    r0=sqrt((xa-xj(j))^2+(ya-yj(j))^2);
    r0p=sqrt((xa-xj(j))^2+(ya+yj(j))^2);
    r0s=sqrt((xa+xj(j))^2+(ya-yj(j))^2);
    r0t=sqrt((xa+xj(j))^2+(ya+yj(j))^2);
    r1=sqrt((xi(i)-xj(j))^2+(yi(i)-yj(j))^2);
    r2=sqrt((xi(i)-xj(j))^2+(yi(i)+yj(j))^2);
    r3=sqrt((xi(i)+xj(j))^2+(yi(i)-yj(j))^2);
    r4=sqrt((xi(i)+xj(j))^2+(yi(i)+yj(j))^2);
    p(i,j)=log(r0*r0p*r0s*r0t/(r1*r2*r3*r4));
end
end
% inversion de la matriz
q=v*inv(p);
% prueba del potencial
for i=1:nax+nay+nbx+nby
    sp=0;
    for j=1:nax+nay+nbx+nby
        r0=sqrt((xa-xj(j))^2+(ya-yj(j))^2);
        r0p=sqrt((xa-xj(j))^2+(ya+yj(j))^2);
        r0s=sqrt((xa+xj(j))^2+(ya-yj(j))^2);
        r0t=sqrt((xa+xj(j))^2+(ya+yj(j))^2);
        r1=sqrt((xp(i)-xj(j))^2+(yp(i)-yj(j))^2);

```

```

r2=sqrt((xp(i)-xj(j))^2+(yp(i)+yj(j))^2);
r3=sqrt((xp(i)+xj(j))^2+(yp(i)-yj(j))^2);
r4=sqrt((xp(i)+xj(j))^2+(yp(i)+yj(j))^2);
p(i,j)=log(r0*r0p*r0s*r0t/(r1*r2*r3*r4));
sp=sp+q(j)*p(i,j);

end

vp(i)=sp;

end

% error medio del potencial

smp=0;

for i=nax+nay+1,nax+nay+nbx+nby

smp=smp+vp(i);

end

errpo=smp/(nbx+nby)

% calculo del campo electrico

for i=1:nax+nay+nbx+nby

sx=0;

sy=0;

for j=1:nax+nay+nbx+nby

r1=sqrt((xi(i)-xj(j))^2+(yi(i)-yj(j))^2);
r2=sqrt((xi(i)-xj(j))^2+(yi(i)+yj(j))^2);
r3=sqrt((xi(i)+xj(j))^2+(yi(i)-yj(j))^2);
r4=sqrt((xi(i)+xj(j))^2+(yi(i)+yj(j))^2);

sx=sx+q(j)*((xi(i)-xj(j))*(1/r1^3+1/r2^3)+(xi(i)+xj(j))*(1/r3^3+1/r4^3));

```

```

    sy=sy+q(j)*((yi(i)-yj(j))*(1/r1^3+1/r3^3)+(yi(i)+yj(j))*(1/r2^3+1/r4^3));
end

ce(i)=sqrt(sx^2+sy^2);

end

% campo maximo

cem=max(ce)

% grafica de las lineas equipotenciales

npx=12;

npy=36;

dax=xa/npx;

day=ya/npy;

x=-npx*dax:dax:npx*dax;

y=-npy*day:day:npy*day;

[X,Y]=meshgrid(x,y);

for ifi=1:2*npy+1

    for ico=1:2*npx+1

        if (abs(X(ifi,ico))<xb)&(abs(Y(ifi,ico))<yb)

            s(ifi,ico)=NaN;

        else

            ss=0;

            for j=1:nax+nay+nbx+nby

                r0=sqrt((xa-xj(j))^2+(ya-yj(j))^2);

                r0p=sqrt((xa-xj(j))^2+(ya+yj(j))^2);

                r0s=sqrt((xa+xj(j))^2+(ya-yj(j))^2);

```

```
r0t=sqrt((xa+xj(j))^2+(ya+yj(j))^2);
r1=sqrt((X(ifi,ico)-xj(j))^2+(Y(ifi,ico)-yj(j))^2);
r2=sqrt((X(ifi,ico)-xj(j))^2+(Y(ifi,ico)+yj(j))^2);
r3=sqrt((X(ifi,ico)+xj(j))^2+(Y(ifi,ico)-yj(j))^2);
r4=sqrt((X(ifi,ico)+xj(j))^2+(Y(ifi,ico)+yj(j))^2);
ss=ss+q(j)*log(r0*r0p*r0s*r0t/(r1*r2*r3*r4));
end
s(ifi,ico)=ss;
end
end
end
[px,py]=gradient(s,2,0.8);
contour(x,y,s,25)
hold on
px=-px;
py=-py;
quiver(x,y,px,py);
hold on.
```

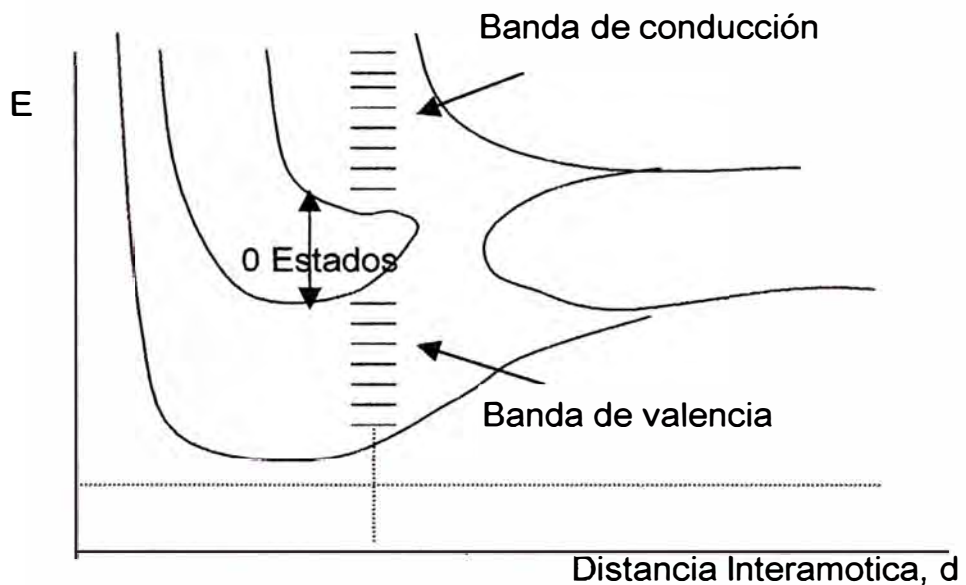
## CAPITULO III MATERIALES DIELECTRICOS

### 3.1 Dieléctricos

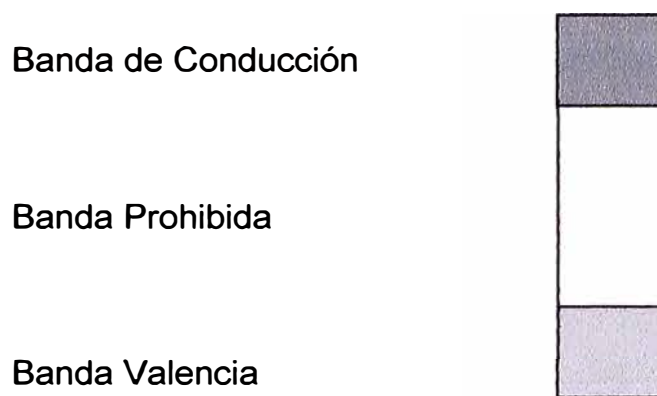
#### 3.1.1 Fundamento Teórico

La explicación científica de la electroconductibilidad en los materiales metálicos, semiconductores y dieléctricos se efectúa mediante la **teoría de bandas del cuerpo sólido**.

Los niveles energéticos de los electrones mas exteriores en una estructura cristalina pueden determinarse por medio de la mecánica cuántica, resolviendo la ecuación de Schrodinger cuya solución conducen a diagramas parecidos al dibujado en la figura 3.1 el cual esquematiza bandas de energía a diferentes distancias interatómicas de la red del cristal.



**Figura 3.1** Variación de los niveles de energía de los átomos con la Variación de la distancia interatómica



**Figura 3.2** Estructura de bandas de energía de un aislante

La teoría de bandas del cuerpo sólido explica claramente la electroconductibilidad en los dieléctricos, semiconductores, metales.

Observando la figura 3.2 los electrones exteriores de valencia del átomo en los niveles de la banda saturada (de valencia) del dieléctrico, no son libres y no pueden tomar parte en el proceso de transferencia de carga y formación de la corriente eléctrica en la red.

Ellos pueden llegar a ser libres al pasar a través de la banda prohibida y caer en la banda de conducción solo en el caso de obtener de afuera una cantidad significativa de energía  $\Delta W$ , es por esta razón en condiciones normales la conductancia de los dieléctricos es ínfimamente pequeño.

### 3.1.1.1 Definición

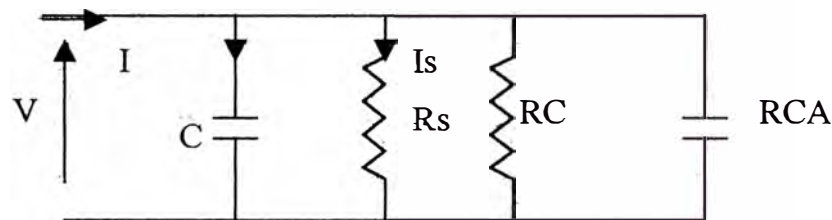
Se define como materia cuya propiedad eléctrica fundamental es la capacidad de polarizarse y en la que puede existir un campo electrostático.

El dieléctrico utilizado como aislamiento consiste en un medio o material que situado entre dos placas de potencial distinto, solo permite la circulación a través de ella de una corriente pequeña o despreciable, en fase con la tensión aplicada.



El aislamiento es una aplicación práctica del dieléctrico, el dieléctrico perfecto impedirá la circulación de corriente entre conductores. El vacío perfecto es el único dieléctrico perfecto.

### 3.1.1.2 Modelo de un Sistema de Aislamiento



**Figura 3.3** Circuito equivalente del modelo de un Aislamiento

Donde:

**C** Condensador de placa paralela que tiene Constante Dieléctrica  
Del material aislante

**$R_s$**  Resistencia de fuga superficial

**$R_c$**  Resistencia de aislamiento conducción

**RCA** Circuito de absorción

**$R_s$**  Función directa de suciedad y humedad

**$I_s$**  Corriente de fuga superficial

**$R_c$**  Función de voltaje y temperatura

Inversamente proporcional a la temperatura

Inversamente proporcional a la humedad

Reducido para nuevo aislamiento curado incompleto

**$I_c$**  Corriente de conducción

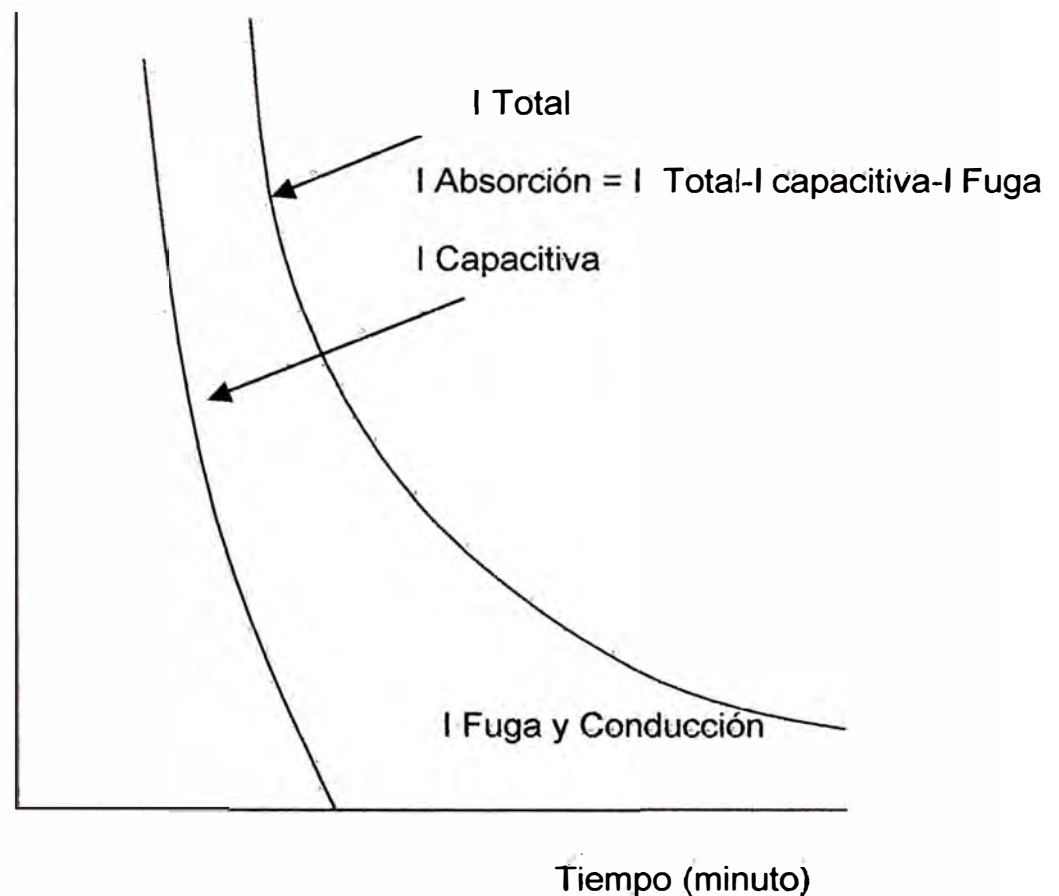
**Rca** Constante de absorción que es una función del voltaje y

Propiedades del aislamiento.

Cuando el aislamiento recibe un voltaje de carga, la corriente capacitiva da un pico instantáneo (segundos), entonces la corriente de absorción desaparece despacio (horas). El componente final estabilizada puede ser la corriente de fuga que consiste de fuga superficial y corriente de conducción. La simple relación de voltaje corriente como expresa la ley de ohm para los conductores eléctricos no es igual en el caso de los dieléctricos porque el tiempo entra en esta relación como un parámetro. Este fenómeno puede ser mostrado en la fig. 3.4

Corriente

(microamperios)



**Figura 3.4** Componentes de la Corriente de Aislamiento en la prueba d.c.

### **3.1.2 Propiedades de los Dieléctricos**

Los materiales dieléctricos son utilizados desde los circuitos eléctricos más elementales hasta sistemas muy complejos que están sometidos a condiciones de uso y manipuleo cada vez más rigurosas y adversas, Temperatura elevada, Humedad, Agentes químicos en suspensión, Radiación, Esfuerzo mecánicos, Abrasión, Altas frecuencias, Intensidad de campo eléctrico y frecuencia de su variación, y otros.

En varios casos las condiciones expuestas anteriormente son perjudiciales para el aislamiento eléctrico y estos actúan a la vez en distintas combinaciones.

Actualmente para determinar el material aislante apropiado para un determinado equipo o sistema se deberán conocer las condiciones de funcionamiento y manipuleo a sí como también las propiedades de los materiales aislantes.

#### **3.1.2.1 Propiedades eléctricas**

Las propiedades eléctricas de los aislamientos son:

- a. Resistencia de aislamiento
- b. Rigidez dieléctrica
- c. Constante dieléctrica
- d. Factor de perdidas dieléctricas
- e. Resistencia al Arco.

##### **3.1.2.1.1 Resistencia de aislamiento**

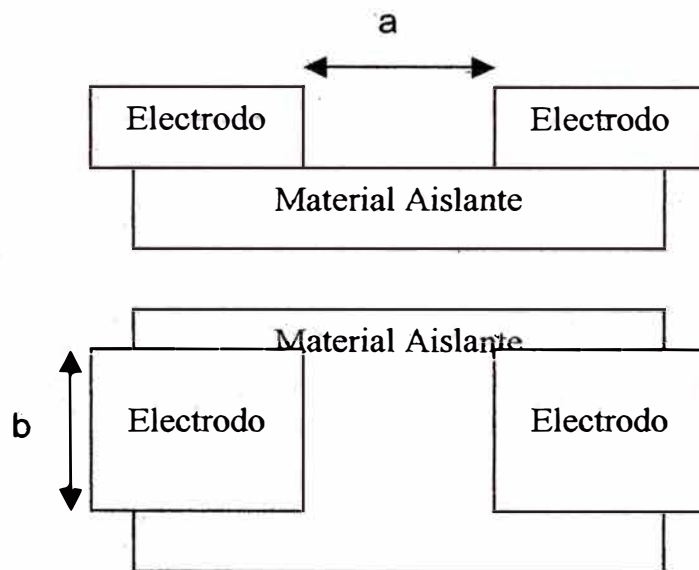
Se denomina resistencia de aislamiento de un material aislante a la resistencia que opone al paso de la corriente eléctrica, medida en la dirección que deba asegurarse el aislamiento.

Como la corriente de fuga de un material aislante sigue dos caminos posibles, uno sobre la superficie del material y otro a través del cuerpo del material, habrá que distinguir entre resistencia de aislamiento superficial y resistencia de aislamiento transversal o volumétrico. Se sobreentiende que estos dos caminos de la corriente de fuga actúan en paralelo, y la pérdida ohmica total depende, en gran parte de las condiciones del material aislante.

Las corrientes superficiales son ínfimas en comparación con las volumétricas y son prácticamente imposible separar las corrientes de escape superficiales de las volumétricas.

### Resistencia Superficial

A Causa de la suciedad, oxidación, humectación inevitable de las capas superficiales del aislamiento eléctrico se crea una electroconductibilidad superficial notoria, en relación con la cual el dieléctrico se caracteriza por el valor de la resistividad superficial.



**Figura 3.5** Esquema de medición de Resistencia Superficial

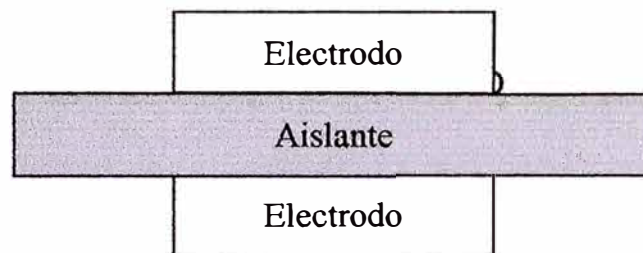
$$R_s = \rho_s \frac{a}{b}$$

Donde el coeficiente de proporcional  $\rho_s$  es la resistividad superficial

La dimensión de  $\rho_s$  coincide con el de  $R_s$  (porque  $a/b$  es adimensional)

### Resistencia de Volumen

Determina cuantitativamente el impedimento del paso de la corriente por el espesor del aislamiento.



**Figura 3-6** Esquema de medición de Resistencia Volumétrica

$$R = \rho_v \frac{L}{S}$$

$$\rho_v = R \frac{S}{L}$$

Donde:  $\rho_v$  tiene por dimensiones ohmio. m / m<sup>2</sup>

En un material aislante, la resistividad volumétrica no es un valor constante, como suele ocurrir con los materiales conductores, sino que varía

con la temperatura, la tensión aplicada, el tiempo, la humedad, el espesor del material.

Destacando los efectos debidos a la variación de temperatura, cuyo aumento produce una disminución de la resistividad volumétrica. Por consiguiente, la comprobación de la resistencia de aislamiento deberá efectuarse a la temperatura máxima que se prevé tendrá que soportar el material.

Naturalmente, cuando mayor sea la resistividad de un material, tanto mejor resultará como aislante. Por consiguiente, al elegir un material como dieléctrico, debe procurarse que tenga una elevada resistividad, para reducir al mínimo las corrientes de fuga. No obstante, este dato no basta por si solo para juzgar la calidad de un aislante, ya que deben considerarse también las restantes propiedades eléctricas, que reseñamos a continuación.

#### **3.1.2.1.2 Rigidez dieléctrica**

El aislante ideal no se conoce todavía; en todos los casos, cuando se aplica una tensión entre las dos caras de una pieza aislante (véase la figura 3.6), esta pieza es atravesada por una pequeña corriente de fuga. Con ello el material aislante se calienta localmente y el calentamiento permite el paso de más corriente (ya que disminuye la resistividad transversal, como hemos dicho anteriormente). Este efecto es acumulativo y, si la tensión alcanza un valor suficientemente elevado, puede producirse la perforación del aislamiento, con las consiguientes perturbaciones o averías sí de trata de un

material en servicio. El fallo se manifiesta por una superficie quemada o por una perforación con volatilización completa del material.

La rigidez dieléctrica del dieléctrico puede considerarse como la intensidad de perforación de campo eléctrico, es decir aquel valor de la intensidad de campo en el dieléctrico, que al ser logrado (en un lugar determinado) causa su perforación.

Se denomina rigidez dieléctrica a la propiedad de un material aislante de oponerse a ser perforado por la corriente eléctrica. Su valor se expresa por la relación entre la tensión máxima que puede apreciarse sin que el aislamiento se perfora (llamada tensión de perforación) y el espesor de la pieza aislante. Suele expresarse en kilovoltios por milímetro (kV/mm).

Debe tenerse siempre en cuenta el espesor del material en que se ha efectuado el ensayo de determinación de la rigidez dieléctrica, ya que ésta no es constante, sino que varía con el espesor del material. Es muy frecuente utilizar erróneamente el concepto de rigidez dieléctrica, por no prestar la debida atención a este particular. Sí, por ejemplo, una lámina de un material dado de 1 mm., de espesor, se perfora a 10 kV., una lámina del mismo material y de 2 mm., de espesor, no se perforará a 20 kV., sino antes. O sea, que el valor de la tensión de perforación no es proporcional al espesor de la lámina: por consiguiente, la rigidez dieléctrica es variable.

Al aumentar la temperatura, la disminución de la rigidez dieléctrica es aún más acusada. Otros factores, como la humedad, el tiempo, entre otros, influyen también en el valor de la rigidez, lo que hace difícil establecer una

cifra que lo refleje con exactitud. Por consiguiente, resulta necesario, en cada caso, expresar las condiciones en que se ha obtenido este dato.

Naturalmente, cuando mayor sea la tensión de perforación de un material, más difícilmente se producirá la perforación en servicio. Por lo tanto, interesa utilizar los materiales de más elevada rigidez dieléctrica, tanto más cuanto más elevada sea la tensión a que deban trabajar.

Hasta un cierto valor de temperatura denominado temperatura límite, la rigidez dieléctrica es independiente de la temperatura, del espesor del aislante y de la duración y la forma de la tensión eléctrica aplicada; por encima de la temperatura límite, ésta influye mucho en el valor de la rigidez dieléctrica, que tal como puede apreciarse en la figura II.7, disminuye rápidamente si aumenta la temperatura.

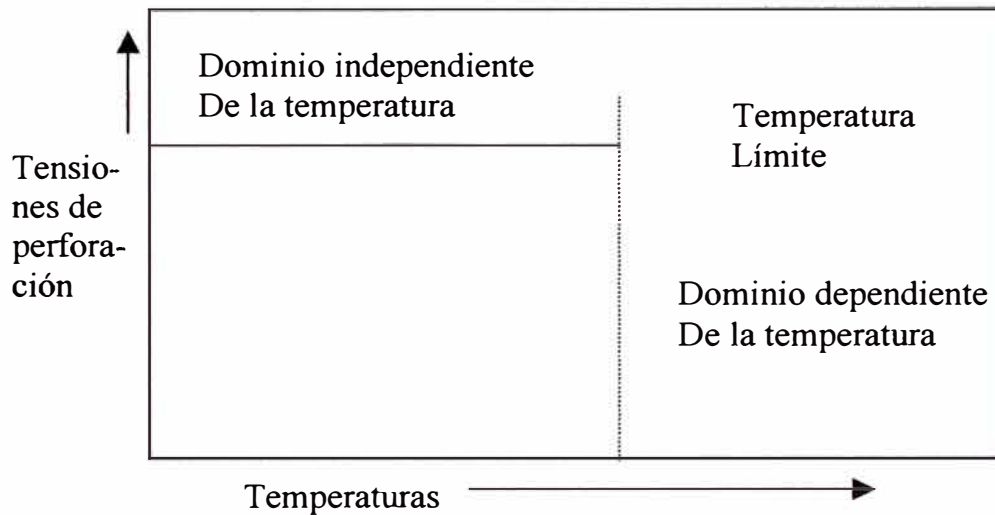
En general, ésta temperatura límite está comprendida entre  $-50^{\circ}\text{C}$  y  $+50^{\circ}\text{C}$ ,

El valor de la temperatura límite es de importancia esencial para la elección de un material aislante apropiado, ya que es un índice de las temperaturas a que puede trabajar dicho material con plena garantía.

Relacionado con el concepto de rigidez dieléctrica está el de perforación. Se habla de perforación eléctrica de un aislante, cuando la descarga disruptiva se produce por debajo del valor de la temperatura límite ya que, en este caso, la perforación se debe exclusivamente, a la tensión aplicada. Cuando la perforación se produce por encima de la temperatura límite, se denomina perforación electrotérmica que se presenta cuando la tensión aplicada, para una temperatura inicial dada, es insuficiente para provocar la



perforación inmediatamente, pero la promueve a causa del calentamiento interno debido a las pérdidas dieléctricas, de las que se hablará en un próximo punto.



**Figura 3.7** Dependencia de la tensión de perforación de la Temperatura

### 3.1.2.1.3 Constante dieléctrica

El empleo de los materiales aislantes en la construcción de condensadores y los efectos capacitivos existentes en los cables de transporte de energía, hace necesario conocer las constantes dieléctricas de los materiales aislantes utilizados en estas aplicaciones.

Recordemos que se llama constante dieléctrica de un material aislante, a la relación entre la capacidad de un condensador que emplea como dieléctrico el material considerado, y la capacidad del mismo condensador empleando como dieléctrico el vacío.

La relación de la permitividad de un dieléctrico ( $\epsilon$ ) y la permitividad del vacío ( $\epsilon_0$ ) se designa como la constante dieléctrica ( $k$ ) del material, lo que nos permite definir la permitividad de cualquier sustancia como el número que

indica cuanto aumenta la capacidad de un condensador a vacío, si, sin variar dimensiones y forma del condensador, lo llenamos de esta sustancia.

La Capacidad de un Condensador Plano

$$C = \varepsilon \frac{\varepsilon_0 S}{h}, = \frac{8.854 \times 10^{-12} S}{h} \text{ Faradio}$$

**Donde :**

**h :** Espesor del dieléctrico (m)

**S :** Area de cada una de las placas (m<sup>2</sup>)

Se deduce que, cuanto mayor sea la constante dieléctrica, mayor será la capacidad del condensador. Y también que será mayor la capacidad cuanto más delgado sea el aislamiento entre placas, o sea cuando menor sea h. No obstante, hay un límite mínimo para este espesor, ya que al mismo tiempo disminuye la rigidez dieléctrica.

Los materiales aislantes que dan mejores resultados como aislante entre placas de condensadores, son las láminas de elevada rigidez dieléctrica. Pero a igualdad de rigidez dieléctrica, el material que debe elegirse es el que posea la constante dieléctrica más elevadas, con objeto, de conseguir la máxima capacidad con el mínimo volumen.

En otras ocasiones ocurre precisamente lo contrario. Por ejemplo, en un cable eléctrico constituido por conductores correspondientes a distinta polaridad o a distinta fase y separados por una capa aislante, para disminuir el efecto capacitivo que se produce, y que no es conveniente en la mayoría de los casos, se emplea un aislamiento más grueso y con una constante dieléctrica lo menor posible.

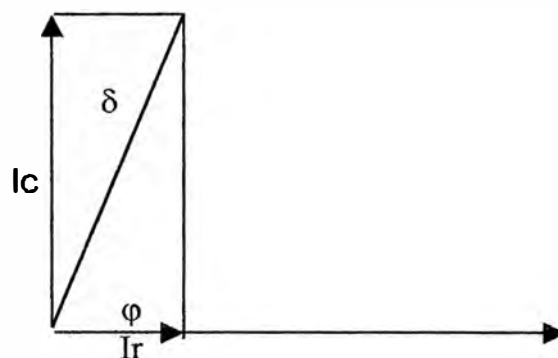
### 3.1.2.1.4 Factor de pérdidas dieléctricas

Se entiende por pérdidas dieléctricas, al valor de perdidas de potencia en el dieléctrico bajo la acción de la tensión aplicada. Estas pérdidas tienen valores reducidos por lo que generalmente, pueden depreciarse en aplicaciones industriales.

La corriente de fuga, al atravesar el material aislante, lo calienta. El factor de pérdidas dieléctricas constituye un criterio para medir la pérdida de potencia por calentamiento de los aislamientos. También se considera una medida de la capacidad de generación de calor por unidad de volumen del material aislante.

A diferencia de los conductores, la gran mayoría de los dieléctricos manifiestan un rasgo característico, a una tensión dada la disipación de la potencia en los dieléctricos depende de la frecuencia de la tensión, además el consumo de potencia es notoriamente mayor a tensión alterna que a tensión constante y crece con rapidez al aumentar la frecuencia, así como al subir la tensión y al aumentar la capacidad.

Angulo de Perdidas dieléctricas



**Figura 3.8** Diagrama Vectorial de Tensiones y Corrientes en un Condensador que está bajo tensión alterna.

El ángulo  $\delta$  se denomina ángulo de pérdidas dieléctricas.

$$\text{Tang } \delta = I_r / I_c$$

$$\text{Tang } \delta = \frac{\text{Potencia.Activa}}{\text{Potencia.Reactiva}}$$

Se comprende fácilmente que, para que cualquier sustancia sea un buen aislante, interesa que las pérdidas dieléctricas sean mínimas. Por lo tanto, es preciso que el valor de  $\text{tg } \delta$  sea lo más pequeño posible.

Conociendo el valor del ángulo de pérdidas, pueden calcularse fácilmente las pérdidas dieléctricas, aplicando la fórmula:

$$P = V I_r$$

$$P = V I_c \text{ tang } \delta$$

$$P = V^2 w C \text{ tang } \delta$$

$$P = V^2 2 \pi f C \text{ tang } \delta$$

$$P = 5.56 \times 10^{-11} \Lambda V^2 f \varepsilon \text{ tang } \delta$$

$P$  = pérdidas dieléctricas, en vatios

$f$  = frecuencia del circulo, en Hz

$C$  = capacidad, en faradios

$V$  = tensión, en voltios.

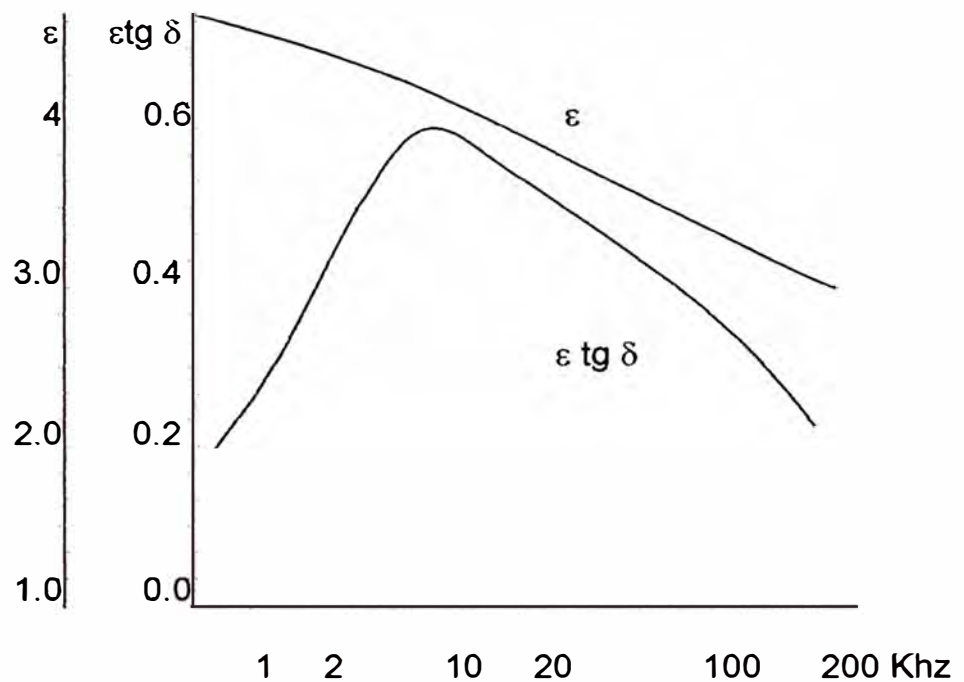
$\Lambda$  = Constante de Configuración geométrica (m)

Por lo tanto, y de acuerdo con lo dicho, es posible clasificar los materiales aislantes por su ángulo de pérdidas. Este varía con la temperatura, la tensión aplicada, entre otros, pero muy especialmente con la frecuencia. En muchos materiales aislantes es inversamente proporcional, en otros sucede lo contrario y en algunos, el factor de pérdidas dieléctrico permanece prácticamente constante en una amplia gama de frecuencias.

Como el factor de pérdidas es determinante para el calentamiento del material y su posible perforación electrotérmica, un material será tanto mejor aislante cuanto menor sea su factor de pérdidas dieléctricas. Y teniendo en cuenta la posible variación con la frecuencia, a la que hemos aludido en el párrafo anterior, en lo que se refiere a la posible aplicación de un material aislante en el campo de las altas frecuencias, deberá tenerse en cuenta el valor que adquiere el factor de pérdidas en la gama de frecuencias en que éste material deba trabajar, ya que si este factor resulta muy elevado, el material es inadecuado.

De acuerdo a los diferentes estudios sobre los materiales dieléctricos, se podrá comprobar que existen materiales aptos para funcionamiento en una gama de frecuencias que comprende desde los industriales (50 Hz) hasta los

de radiofrecuencia (del orden de 1 Mhz); en otros casos, los materiales sólo son aptos para su funcionamiento a bajas frecuencias ya que su factor de pérdidas se hace muy grande a altas frecuencias; otros materiales, finalmente, tienen un factor de pérdidas muy reducido a alta frecuencia y elevado a baja frecuencia, por lo que sus aplicaciones deben limitarse al campo de alta frecuencia.



**Figura 3.9** Variación de  $\epsilon$ ,  $\epsilon \operatorname{tg} \delta$  con respecto de la frecuencia

### 3.1.2.1.5 Resistencia al arco

Algunos elementos que emplean materiales aislantes, por su función específica (interruptores, contactores, apagadores de chispas, conmutadores,

tomas de corriente). Están frecuentemente sometidos a la acción de arcos eléctricos, que puedan llegar a inutilizar el aislamiento.

La resistencia al arco se mide por el tiempo que un material aislante es capaz de resistir los efectos destructivos de un arco antes de inutilizarse por haber formado el arco un camino carbonizado, conductor, sobre la superficie del aislante. Este tiempo depende, naturalmente, de la tensión aplicada y de la corriente del arco.

No todos los materiales aislantes se carbonizan pero si casi todos pueden agrietarse por el intenso calor que acompaña al arco. No obstante, algunos materiales resultan mejores que otros en lo que respecta a la resistencia al arco, ya que las condiciones en que éste se produce, varían considerablemente. Debe seleccionarse cuidadosamente el material más idóneo para cada caso, de acuerdo con las recomendaciones de las firmas fabricantes.

Para disminuir la acción del arco, se incorporan a los aparatos eléctricos diversos dispositivos tales como cámaras apagachispas, bobinas de soplado.

### **3.1.2.2 Propiedades Mecánicas**

Las principales propiedades mecánicas que deben considerarse en los materiales aislantes, son las siguientes:

- a) Resistencia a la tracción
- b) Resistencia a la compresión
- c) Resistencia a la flexión
- d) Resistencia a la cortadura
- e) Resistencia al choque

- f) Dureza
- g) Límite elástico
- h) Máquinabilidad

#### **3.1.2.2.1 Resistencia a la tracción**

Es la propiedad de resistir esfuerzos mecánicos que tienden a estirar o a alargar un material. La resistencia a la tracción de la mayoría de los materiales aislantes es relativamente baja y está comprendida entre 140 - 550 kg/cm<sup>2</sup>. Sin embargo, en algunos plásticos extraídos se han obtenido cifras del orden de 4,200 kg/cm<sup>2</sup>.

El sistema moldeado tiene una importante influencia en el valor de la resistencia a la tracción, así como la temperatura y la humedad.

#### **3.1.2.2.2 Resistencia a la Compresión**

Es la propiedad del material que le permite resistir esfuerzos mecánicos que tiendan a acortarlo o comprimirlo. Los valores de resistencia a la compresión, por lo general, son más elevados que los de resistencia a la tracción, o sea que se necesitará más esfuerzo para romper un material aislante por compresión que por tracción. Según el tipo de material el valor de la resistencia a la compresión está comprendido entre 500 y 2500 kg/cm<sup>2</sup>.

Lo mismo que en el caso anterior, la temperatura influye notablemente en la resistencia a la compresión, que disminuye con el aumento de aquella.

#### **3.1.2.2.3 Resistencia a la Flexión**

Es la capacidad del material para resistir esfuerzos que tiendan a doblarlo. De la misma forma que en las anteriores propiedades, la resistencia a la flexión está influenciada por la humedad y por la temperatura.



#### **2.1.2.2.4 Resistencia a la Cortadura**

Es la propiedad, por la cual un material resiste esfuerzos mecánicos que tienden a cortarlo, haciendo deslizar una parte del material sobre la otra.

#### **3.1.2.2.5 Resistencia al choque**

Es la capacidad del material para resistir el impacto de un choque o golpe.

#### **3.1.2.2.6 Dureza**

Es una característica muy directamente relacionada con la resistencia a la compresión y puede definirse como la resistencia que opone un material a ser penetrado por una bola o un punzón.

#### **3.1.2.2.7 Límite Elástico**

Todo material, por muy buenas que sean sus propiedades mecánicas, pueden resistir los esfuerzos que acabamos de enumerar solamente hasta cierto límite, por encima del cual se deforma, sin volver a recuperar su forma primitiva. Se denomina límite elástico de un material, al esfuerzo máximo que puede aplicarse al mismo, sin que experimente deformaciones permanentes. Por debajo de este valor máximo aplicable, existen otros que también producen la deformación del material pero éste, una vez que cesa el esfuerzo, recupera su forma primitiva. A estas deformaciones se les llama deformaciones elásticas.

#### **3.1.2.2.8 Maquinabilidad**

Se denomina maquinabilidad de un material, a la facilidad con que puede ser mecanizado con herramientas cortantes. Algunos materiales

aislantes presentan una extraordinaria facilidad para el mecanizado, mientras que otros son muy difíciles de trabajar.

El mecanizado de piezas de materiales aislantes en máquinas herramientas se hace necesario en muchas ocasiones como, por ejemplo, cuando la precisión de las formas o las tolerancias de fabricación, son muy estrechas y no pueden obtenerse en el moldeo, también cuando han de fabricarse piezas que se encuentran comercialmente en forma de planchas, tubos, perfiles.

Las herramientas que se deberán usar para moldear los aislantes deben ser especiales ya que como los materiales aislantes son malos conductores del calor, casi la totalidad del calor generado en el filo de la herramienta ha de ser evacuado por la propia herramienta, en lugar de serlo también por la pieza, como ocurre con los metales. Por lo tanto, puede ocurrir que la herramienta se caliente excesivamente y es fácil que, en este caso, se destemple.

En las operaciones de mecanizado de piezas de material aislante ha de ponerse gran cuidado en evitar grietas u otros daños que pudieran mermar las cualidades dieléctricas del material.

### **3.1.2.3 Propiedades Físicas**

Entre estas propiedades, se incluyen las siguientes:

- a. Peso específico
- b. Porosidad
- c. Higroscopicidad

### **3.1.2.3.1 Peso específico**

Recordaremos que el peso específico de un material es el peso de la unidad de volumen de dicho material. El peso específico suele expresarse en gramos por centímetro cúbico (gr/cm<sup>3</sup>)

### **3.1.2.3.2 Porosidad**

Es la propiedad que tienen todos los cuerpos de dejar espacios vacíos, o poros, entre sus moléculas, gracias a lo cual pueden ser comprimidos o dilatados y hacerse permeables a los gases y aún a los líquidos.

La porosidad constituye un gran inconveniente de la buena calidad de los materiales aislantes, pues en los poros se acumula humedad y el polvo del ambiente en que se encuentran. Pero aún en el caso de que el ambiente no sea húmedo ni polvoriento, el aire que llena los poros, por la acción del campo eléctrico, se ioniza, perdiendo el material sus propiedades aislantes y ocasionando su pronta destrucción.

### **3.1.2.3.3 Higroscopicidad**

Se denomina higroscopicidad o poder higroscópico a la capacidad de absorción de la humedad que tiene un material.

Casi todos los aislantes absorben humedad, algunos en proporciones elevadas, otros en cantidades despreciables. La higroscopicidad de un material aislante constituye una consecuencia directa de la propiedad anterior, la porosidad, ya que es en los poros donde se aloja el agua, la cual se incorpora al material procedente de la humedad atmosférica o del ambiente húmedo en que se encuentra dicho material.

En los materiales aislantes, la humedad reduce considerablemente la rigidez dieléctrica y la resistencia de aislamiento. Por consiguiente y siempre que sea posible, se preferirán los aislantes de menor higroscopicidad. En algunas ocasiones, para reducir los efectos de la humedad, se reviste el material de una capa impermeable.

#### **3.1.2.4 Propiedades químicas**

Los materiales que constituyen los aislamientos de las máquinas, aparatos e instalaciones eléctricas están frecuentemente sometido a la acción de ambientes que contienen líquidos, gases y vapores corrosivos, que ocasionan su lento pero continuo envejecimiento, acabando por su destrucción. A la acción destructiva de los agentes químicos, se une la del campo eléctrico, que actúa desfavorablemente sobre los aislamientos por medio de las descargas que se producen con las elevadas tensiones, descargas muchas veces visibles en la oscuridad, especialmente cuando la tensión aumenta, en cuyo caso llegan a hacerse bien visibles en forma de rayos luminosos. El campo eléctrico transforma parte del oxígeno del aire en ozono, de gran poder oxidante, como veremos seguidamente, y que actúa nociva e intensamente sobre los materiales aislantes. Por estas razones, se hace necesario que los materiales que se han de utilizar como aislantes, tengan buenas propiedades químicas.

En general, los aislantes se caracterizan por su buena resistencia química. Es bien conocida su resistencia a productos químicos que atacan al acero y al latón. Incluso, algunos aislantes resisten los efectos del ácido fluorhídrico, que ataca el cristal. Las propiedades que pueden indicar la

conveniencia de utilizar un material aislante en las aplicaciones electrotécnicas, son las siguientes:

- a. Resistencia al Ozono
- b. Resistencia a la Luz Solar
- c. Resistencia a los Acidos y Alcalis
- d. Resistencia a los Aceites

#### **3.1.2.4.1 Resistencia al Ozono**

El ozono es una forma alotrópica del oxígeno cuya fórmula química es  $O_3$ , es decir, que tiene una molécula constituida por tres átomos de oxígeno (la fórmula del oxígeno molecular ordinario es  $O_2$ , o sea que está constituida por dos átomos de oxígeno). El ozono se produce al ionizarse el aire por acción del campo eléctrico; es mucho más oxidante que el oxígeno ordinario y fácilmente reconocible por su olor peculiar.

Los materiales empleados para aislamiento de cables están a veces sometidos a la acción del ozono desprendido, sobre todo cuando las tensiones de servicio son elevadas. Como hemos dicho anteriormente el ozono es un poderosos oxidante y es la causa del fuerte olor que aprecia después de las tormentas o cuando se producen descargas eléctricas. Para contrarrestar, en lo posible, sus efectos, se utilizan sustancias especiales denominadas antioxidantes.

#### **3.1.2.4.2 Resistencia a la Luz Solar**

Debido a su contenido de radiaciones ultravioletas, la luz solar provoca reacciones químicas, especialmente en verano. Las quemaduras producidas

por el sol son uno de sus efectos y otros, son los cambios químicos provocados en muchos materiales aislantes.

Los efectos de la luz solar sobre los aislamientos son: su decoloración y transformación en un material frágil, que puede resultar inadecuado.

Para la misión que debía cumplir, en los aislantes que ya son incoloros no se produce, naturalmente, la decoloración si no que, por el contrario, se observa una tonalidad amarillenta que se acentúa con el tiempo.

#### **3.1.2.4.3 Resistencia a los Acidos y a los Alcalis**

Una de las más ventajosas propiedades de muchos aislantes es su conocida resistencia a los efectos destructivos de los ácidos y de los álcalis. Aunque el grado de resistencia a estas sustancias es variable, por lo general, el ataque es lento y aumenta con la temperatura.

El efecto de los ácidos y de los álcalis sobre los materiales aislantes difiere de su efecto sobre los metales, pues éstos se disuelven por la acción de los ácidos, mientras que por lo general, los aislantes se descomponen por la acción de los ácidos fuertes y de los álcalis. Esta descomposición se manifiesta primero por un ablandamiento y, a veces, por un aumento de volumen del material afectado, resultando notablemente disminuidas sus propiedades mecánicas y eléctricas.

#### **3.1.2.4.4 Resistencia a los aceites**

En general, los aislantes son resistentes a la penetración del aceite y a la pérdida de resistencia por esta causa, tanto si se trata de aceites minerales, vegetales o animales.

### **3.1.2.5 Propiedades Térmicas**

Las siguientes propiedades térmicas son las más importantes a considerar en las aplicaciones eléctricas.

- e. Calor Especifico.
- f. Conductividad Térmica
- g. Inflamabilidad
- h. Temperatura de Seguridad

#### **3.1.2.5.1 Calor Especifico**

El calor específico de un material, es la cantidad de calor necesaria para elevar un grado centígrado, la temperatura de un gramo de dicho material.

Se comprenderá fácilmente que en los materiales destinados para su aplicación como aislantes, interesa siempre que el calor específico sea lo más elevado posible, con objeto de que al estar sometido el material a la acción del calor, su elevación de temperatura sea pequeña puesto que, como se verá más adelante, las altas temperaturas ocasionan graves daños en éstos materiales.

#### **3.1.2.5.2 Conductividad Térmica**

Se llama así a la facilidad que un material presenta al paso del calor. Cuanto menor sea la conductividad térmica de un aislante, con mayor dificultad permitirá la transmisión de calor, generado en el conductor eléctrico por efecto Joule, a los cuerpos vecinos y al ambiente que le rodea. Por esta razón, las piezas aislantes de los aparatos eléctricos interesa que estén construidas con materiales de baja conductividad térmica para que puedan tomarse con las manos sin que sea apreciable el efecto del calor.

### **3.1.2.5.3 Inflamabilidad**

Es la facilidad que tiene un material para inflamarse. Algunos aislantes son muy inflamables mientras que otros sólo son ligeramente y otros son completamente inflamables. Siempre que sea posible se ha de preferir el menos inflamable, el cual ofrecerá en todo momento una mayor seguridad de funcionamiento, sobre todo si ha de trabajar a altas temperaturas, o en lugares con peligro de incendios, chispas.

### **3.1.2.5.4 Temperatura de Seguridad**

La gran mayoría de materiales aislantes empleados en máquinas e instalaciones eléctricas, trabajan a temperaturas superiores a la del ambiente, debido a las pérdidas de energía que se producen, y que manifiestan en forma de energía calorífica. La elevación de temperatura de los aislantes altera sus características, disminuyendo su resistencia de aislamiento, su rigidez dieléctrica, y también, su resistencia mecánica, además que aumenta su facilidad para ser atacados por agentes químicos.

Por consiguiente, es muy importante conocer la capacidad de resistencia a la acción del calor o la temperatura límite a que pueden estar sometidos los aislantes sin que se produzca la degradación de sus características, que los conducirá a su destrucción. Esta es la que se denomina temperatura de seguridad.

Cuando por excesiva elevación de la temperatura se produce la destrucción del aislante de una máquina eléctrica, suele decirse que la máquina "se ha quemado". No obstante, la mayoría de las veces ésta avería se presenta sin que haya habido combustión en el sentido en que



normalmente se entiende esta palabra, y muy raramente se presenta la producción de llamas. Debe tenerse en cuenta que la perforación del dieléctrico no se presenta inmediatamente al llegar a cierta temperatura crítica, sino que se produce por la acción prolongada de dicha temperatura.

Antes de su destrucción propiamente dicha, muchos aislantes, alcanzan cierta temperatura, se ablandan y deforman; se dice entonces que han alcanzado su punto de reblandecimiento.

Naturalmente, la temperatura de seguridad anteriormente citada y que es la máxima a que se puede trabajar el aislante, ha de ser inferior a la temperatura en que alcanza su punto de reblandecimiento.

Muchos materiales aislantes tienen su punto de reblandecimiento bajo, en la mayoría de ellos, la temperatura de seguridad es inferior a 90°C. Esto resulta satisfactorio durante las operaciones de moldeo cuando se trata de fundirlos para darles forma, pero es un gran inconveniente para su utilización, pues no pueden someterse a temperaturas elevadas.

El punto de reblandecimiento, o temperatura en que se inicia la pérdida de cualidades del material, no está bien definida. Más que un punto es una zona de temperaturas. Además se puede comprobar que, si al mismo tiempo que se va elevando la temperatura de un aislante, se le tiene sometido a un esfuerzo mecánico, la destrucción sobreviene antes de lo que cabría esperar.

Por lo tanto, deberá fijarse la temperatura máxima a que pueda trabajar un material aislante o temperatura de seguridad, teniendo muy en cuenta las anteriores consideraciones.

### Clasificación Térmica del Material de Aislamiento de Equipos Eléctricos

IEC	
Clase Térmica	Temperatura de Trabajo
Y	90 °C
A	105 °C
E	120 °C
B	130 °C
F	155 °C
H	180 °C
C	220 °C
250	250 °C

**Tabla 3.1** Clasificación Térmica de los materiales aislantes

### 3.2 Materiales de Última Generación

Actualmente para preparar materiales aislantes se emplean diferentes métodos y nuevas técnicas como, Síntesis químicas, formación artificial de monocristales, obtención de películas finas de diferentes materiales, aplicación de películas sobre distintos soportes, diversos tipos de purificación muy profunda, acción de campo electromagnético y de radiaciones ionizantes sobre los materiales.

Los materiales aislantes se deben de utilizar de acuerdo a sus características y usos específicos, a continuación describiremos algunos materiales aislantes de última generación.

### 3.2.1 Kapton

Kapton, es una película de poliamida que posee una única combinación de propiedades que lo hace ideal para una variedad de aplicaciones en diferentes industrias. La habilidad del Kapton para mantener estas excelentes propiedades eléctricas, físicas y mecánicas sobre un rango de temperatura amplio ha sido lograda por nuevos diseños y aplicaciones en el área de películas de plástico.

Kapton es sintetizado por polimerización de un anhídrido aromático y una diamina aromática. Tiene excelente resistencia a los agentes químicos, y no hay solvente orgánico conocido como la película. Kapton no se funde o quema hasta el más alto rango de inflamación de la norma UL-94.

Las propiedades excelentes de Kapton permiten ser usadas en ambas condiciones extremas de alta y baja temperatura donde otros materiales polímeros orgánicos no pueden funcionar.

Kapton Película poliamida puede ser usada en una variedad de aplicaciones de aislamiento en electrónica y eléctricas, encintado de alambres y cables, aislamiento de bobinas, Aislamiento de alambres magnéticos, Aislamiento de Transformadores y Condensadores, Substratos para circuitos impresos flexibles. Cualquiera de estas aplicaciones son basadas por su excelente balanceada propiedades eléctricas, mecánicas, físicas, químicas y térmicas sobre un rango amplio de temperaturas.

Estas combinaciones de propiedades útiles en temperaturas extremas hace que Kapton sea única en la industria.

Existen tres tipos de Kapton que describiremos a continuación

**Kapton Tipo HN**, Película poliamida puede ser utilizada con mucho éxito, en aplicaciones de temperaturas tan bajas  $-269\text{ }^{\circ}\text{C}$  hasta tan altas como  $400\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Tipo HN pueden ser laminados, metalizados, picados, formados, o cubiertas con adhesivos, existen desde  $7.5\text{ }\mu\text{m}$  hasta  $125\text{ }\mu\text{m}$  de espesores.

**Kapton Tipo VN**, Película poliamida con las mismas propiedades del tipo HN, más superior estabilidad dimensional. Tipo VN son posibles desde  $12.5\text{ }\mu\text{m}$  hasta  $125\text{ }\mu\text{m}$ .

**Kapton Tipo FN**, Película cubierta con adhesivos por ambas caras, FEP Resina Fluoropolimero, imparte sello del calor, proporciona una barrera de humedad, y refuerza la resistencia química. El tipo FN son posibles en espesores cuyas medidas dependen de las combinaciones del Kapton y el Teflon.

En adición a estos tres tipos de Kapton, son disponibles con los siguientes atributos.

Antiestáticos

Conductividad térmica

Resistencia a la corona

Poliamida para circuito de línea fina

Pigmentado para color

### **3.2.1.1 Propiedades Eléctricas**

Las propiedades eléctricas más comunes de la película poliamida Kapton, de varias medidas son mostradas en la tabla 3.2, Estos valores han sido medidos a  $23\text{ }^{\circ}\text{C}$  y  $50\%$  de humedad relativa. El efecto de tales factores

como humedad, temperatura, y frecuencia sobre estos básicos valores pueden ser encontrados en la tabla 3.3.

Propiedad Espesor	Valores Típicos	Condiciones de Prueba	Método Prueba
Rigidez Dieléctrica  25 Um (1 mil ) 50 um (2 mil ) 75 um (3 mil ) 125 um (5 mil )	V/um(kV/mm) (V/mil)  303 (7,700) 240 (6,100) 205 (5,200) 154 (3,900)	60 Hz ¼" Electrodos subida de 500V/seg	ASTM D – 149-91
Constante Dieléctrica  25 um (1 mil ) 50 um (2 mil ) 75 um (3 mil ) 125 um (5 mil )	  3.4 3.4 3.5 3.5	1 Khz	ASTM D – 150-92
Factor Disipación  25 um (1 mil ) 50 um (2 mil ) 75 um (3 mil ) 125 um (5 mil )	  0.0018 0.0020 0.0020 0.0026	1 kHz	ASTM D – 150-92
Resistividad Volumétrica  25 um (1 mil ) 50 um (2 mil ) 75 um (3 mil ) 125 um (5 mil )	$\bar{\rho}$ cm  1.5 x 10 exp(17) 1.5 x 10 exp(17) 1.4 x 10 exp(17) 1.0 x 10 exp(17)		ASTM D – 257-91

**Tabla 3.2** Propiedades Eléctricas del Kapton , Pelicula Tipo HN

Humedad Relativa(%)	Rigidez Dieléctrica (AC) V/um V/mil	Constante Dieléctrica	Factor de Disipación
0	339	8600	3.0
30	315	8000	3.3
50	303	7700	3.5
80	280	7100	3.7
100	268		3.8
	6800		0.0035

**Tabla 3.3** Humedad Relativa vs. Propiedades Eléctricas Kapton HN, 25um

### 3.2.1.2 Propiedades Físicas y Térmicas

La película poliamida Kapton, retiene sus propiedades físicas sobre un rango amplio de temperatura. Estas pueden ser usadas en aplicaciones de campo donde la temperatura ambiente es tan bajo como  $-269\text{ }^{\circ}\text{C}$  y tan alto como  $400\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

En la tabla 3.4 y tabla 3.5 se presentan los datos técnicos en un rango de temperatura desde  $23\text{ }^{\circ}\text{C}$  hasta  $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Propiedades Físicas	Valores Típicos $23\text{ }^{\circ}\text{C} - 200^{\circ}\text{C}$		Método de Prueba
Tensión de ultimo esfuerzo, Mpa	231	139	ASTM D-882-91
Punto de deformación	69	41	ASTM D-882-91
Esfuerzo produce 5% Elongación, Mpa	90	61	ASTM D-882-91
Fuerza de Impacto, N.cm	78		Prueba de Impacto
Densidad, g/cc	1.42		ASTM D-1505-90
Coefficiente de Fricción Cinético	0.48		ASTM D-1894-90
Coefficiente de Fricción Estático	0.63		ASTM D-1894-90

**Tabla 3.4** Propiedades Físicas Película de Kapton® HN, 25um (1 mil)

Propiedades Térmicas	Valor Típico	Condición Prueba	Método de prueba ASTM
Punto Fundición	Ninguno	Ninguno	E-794-85
Coeficiente térmico de Expansión lineal	20 ppm/°C	-14 a 38°C	D-696-91
Coeficiente de Conductividad Térmica W/m.°K	0.12	23°C	F-433-77
Calor Especifico, J/g°K	1.09		Calorímetro
Inflamabilidad	94V – 0		UL-94
Contracción, (%)	0.17	30 min a 150°C	D-5214-91
	1.25	120 min a 400°C	

**Tabla 3.5** Propiedades térmicas Película de Kapton□, HN, 25um (1mil)

### 3.2.2 Nomex

Papel aramida es una Poliamida aromática y es generalmente conocida como una aramida. La estructura molecular del material es particularmente estable y las propiedades del papel nomex son consecuencia de esta.

Papel Aramida Nomex es un polímero poliamidico aromático de tipo sintético que ofrece altos niveles de rigidez dieléctrica, química y mecánica, en sus distintas presentaciones en lamina, el nombre químico es poly meta phenylenediamine isophthalamide, existen en varios tipos y espesores y para cada cual una aplicación de aislamiento eléctrico.

**Nomex 410.** Es la forma inicial de papel nomex y su uso esta generalizado en la mayoría de las aplicaciones de equipos eléctricos. Se fabrica en 11 espesores diferentes (desde 0.05 hasta 0.76 mm, o 2 a 30 mil) con pesos específicos desde 0.7 hasta 1.2. Como producto calandrado presenta, de forma inherente, unos altos valores de rigidez dieléctrica, resistencia

mecánica, flexibilidad y elasticidad. El 410 se emplea en casi todas las aplicaciones conocidas de aislamiento laminar.

**Nomex 411.** Es la base sin calandrar del tipo 411, se suministra en cinco espesores ( de 0.13 a 0.58mm, o 5 a 23 mil) con un peso específico de 0.3 y con propiedades eléctricas y mecánicas comparativamente menores. Se utiliza en aplicaciones como el aislamiento de fase en motores y la carga de extremo de bobina de transformadores, donde el volumen y la conformabilidad son de la máxima importancia. El tipo 411 ofrece una impregnabilidad y saturabilidad en relación al tipo 410.

**Nomex 414.** Es un papel de propiedades eléctricas y térmicas similares a las del tipo 410, pero calandrado bajo distintas condiciones para obtener una lamina fuerte aunque más flexible y conformable.

Se fabrica en cinco espesores (de 0.09 a 0.38mm) y su peso específico esta entre 0.9 y 1.0. El tipo 414 fue concebido para ser usado como aislante de ranuras en los motores arrollados manualmente y para la cubierta lineal de cables, pero se emplea también en otras aplicaciones en las que sus características resultan ventajosas.

**Nomex 418.** Denominado también papel aramida y mica, estrechamente ligadas con la floca y fibridos durante el proceso de elaboración del papel. Se suministra en cinco espesores distintos (de 0.08 a 0.36 mm) y esta concebido para aplicaciones de alta tecnología, como cubierta de conductores en motores de bobinas, y como aislamiento de tierra y capas en los transformadores. El tipo 418 es un producto calandrado con alta rigidez dieléctrica inherente (30 a 40 kV/mm), pero también puede impregnarse



fácilmente con barnices en casos de ser conveniente. El tipo 418 es más duradero, bajo condiciones de tensión, que el tipo 410.

### 3.2.2.1 Propiedades Eléctricas

Las típicas propiedades eléctricas para el tipo 410 son mostradas en la tabla 3.5. La Rigidez dieléctrica escalón rápido AC representa el nivel de esfuerzo de tensión resistido para 10 a 20 segundos periodo de tiempo a una frecuencia de 60 Hz. Estos valores difieren del potencial de fuerza alargo plazo. Se recomienda para tensiones continuas no exceder 1.6 kV/mm para minimizar el riesgo de descargas parciales (corona). La Rigidez dieléctrica con un Impulso de Onda Completa en la tabla 3.6 se genero sobre las hojas, tal como en la capa y aplicaciones de barreras aislantes. La geometría del sistema tiene un efecto sobre el actual valor de impulso del material.

La temperatura tiene un efecto menor sobre la rigidez dieléctrica y la constante dieléctrica.

Espesor nominal ( mm)	0.05	0.08	0.13	0.18	0.25	0.30	0.38	0.51	0.61	0.65	0.76
Rigidez Dieléctrica AC Pico Rápido (kV/mm)	17	22	26	33	32	33	32	31	32	32	27
Imp. Onda Completa (Kv/mm)	39	39	55	55	63	N/A	55	55	N/A	N/A	49
Const. Dieléctrica 60 Hz	1.6	1.6	2.4	2.7	2.7	2.9	3.3	3.4	3.7	3.7	3.7
Fac. Perdidas x 10ex(-3)	4	5	6	6	6	7	7	7	7	7	7

**Tabla 3.6** Propiedades eléctricas típicas Nomex tipo 410

### 3.2.3 Micaglass 2596

Es un material compuesto de papel de mica, resina de silicona y tela de vidrio especialmente tejida para resistir la manipulación en el momento del rebobinado. La tela de vidrio proporciona la fuerza de tracción y a la vez previene deslizarse en el momento de encintar alambres finos debido a la aspereza del tejido.

Este material es altamente flexible y pueden aplicarse manualmente o con encintadora automática.

La aplicación de este material es ideal para el aislamiento de cabezas de bobinas de media y alta tensión donde la flexibilidad, la rigidez dieléctrica, y la resistencia térmica son bastante exigidas por este tipo de maquinas. También puede usarse para aislar transformadores en seco y motores de tracción, ya que debido a la resina de silicona que lleva lo ha convertido en un material de clase H (180°C).

Las propiedades más importantes se muestran en la siguiente tabla 3.7

Propiedades	Unidad	Valores	Valores	Método de Prueba
Tipo		596	2597	
Espesor	Mm	0.11	0.16	IEC 371-2
Tolerancia	Mm	+/- 0.015	+/- 0.015	IEC 371-2
Papel de mica	G/m2	85 +/- 10	125 +/- 15	IEC 371-2
Fuerza de Tracción	N/mm	10 +/- 2	10 +/- 2	IEC 371-2
Tensión de Ruptura	KV.	3.5	4.5	IEC 371-2
Sustancia Gramaje	G/m2	155 +/- 15	220 +/- 20	IEC 371-2
Clase Térmica		H 180 °C	H 180 °C	IEC 371-2

**Tabla 3.7** Propiedades principales del Micaglass.

### **3.2.4 Barniz Graduante de Tensión.**

Este barniz graduante de tensión o protector del efecto corona, aire seco, gris pigmentado, usado en sistemas de aislamiento de clase F para maquinas de alto voltaje.

Existen dos tipos:

8001 Resina Fenolica Modificada con carbon siliconado

8002 Resina Acrílica Modificada con carbón siliconado.

#### **3.2.4.1 Aplicación**

Todas las maquinas con una tensión de operación de 6.3 kV y superior a esta, deberán tener un revestimiento protector de descargas.

Durante el diseño de una maquina de alta tensión se tiene que considerar el problema de descargas eléctricas. Esta descarga local es la principal causa de la destrucción lenta del aislamiento por consiguiente debe ser prevenido. Las descargas pueden ocurrir dentro o fuera de la ranura.

Fuera de la ranura, es deseable tener una distribución de tensión casi lineal a lo largo de la bobina. Esta meta puede ser lograda usando una semiconductor con resistencia que depende de la tensión. El Barniz graduante de tensión 8001 y 8002 son convenientemente especiales para este propósito.

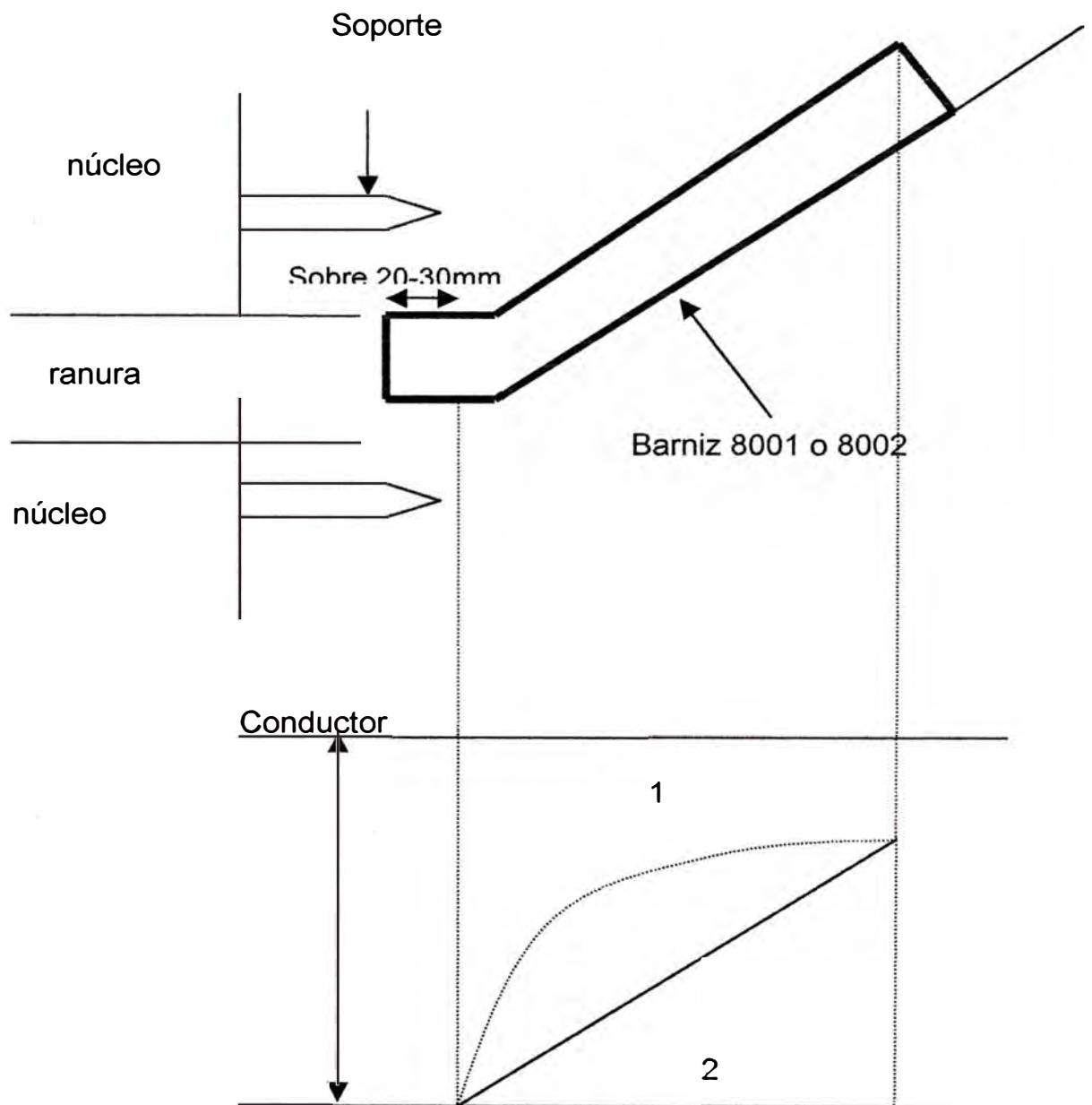
Estos barnices son usados para prevenir descargas en las barras del estator y bobinas en todos partes de alta tensión de la maquina. Estos también pueden ser usados para producir la necesaria protección del efecto corona en pruebas, aisladores.

Los barnices son eficaces en dos maneras.

La favorable resistencia al calor del carbón siliconado en el barniz, resiste al efecto de tensiones pico, protegiendo debajo la superficie del aislamiento de la erosión, causada por las descargas. Las características

Voltaje – Corriente de la capa de barniz, que es no-lineal, asegura una distribución favorable del potencial sobre la superficie del aislamiento.

La siguiente ilustración muestra el esquema de la capa de protección del efecto corona de una bobina de alta tensión, como la curva de voltaje bajo una prueba aplicada de voltaje sobre la bobina con y sin capa graduante de tensión.



**Figura 3.10** Distribución de la Tensión a lo largo del final de la bobina.

- (1) Sin la Capa graduante de tensión
- (2) Con la Capa graduante de tensión.

### 3.2.4.2 Proceso

Debido a la alta densidad del pigmento rápidamente se asienta al fondo del recipiente; por consiguiente el barniz siempre tiene que ser revuelto antes del uso.

El barniz puede ser aplicado con brocha para toda la superficie. La viscosidad puede ser ajustada usando el thinner apropiado.

Se recomienda aplicar una capa individual delgada, resultando una capa final de 0.2 – 0.5 mm, de espesor. Antes de aplicar la próxima capa, esperar 30 minutos para permitir secar la capa anterior.

El contacto debe ser realizado entre el conductor y la capa gradiente de tensión, la capa gradiente de tensión debe tener un solape con la capa conductora de 20 a 30 mm.

La capa de barniz conductiva tiene que extenderse ligeramente mas allá de las partes de metal que están al potencial cero. Esto determina la posición del solape de ambas capas.

Para determinar la mínima longitud de la capa gradiente de tensión, se realiza con un valor promedio de 2 kV/cm.

Ejemplo:

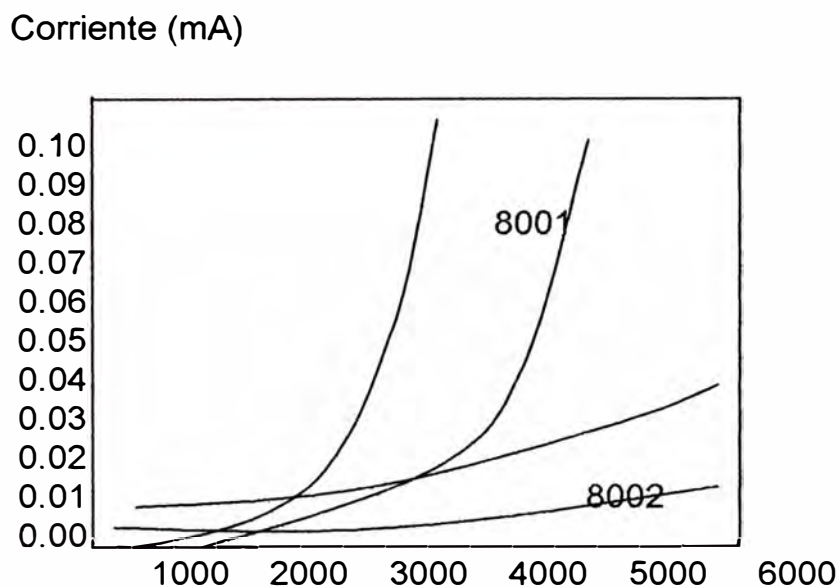
Tensión de Operación: 15 kV

Tensión de Prueba: 33 kV.

Longitud de la Capa:  $33/2 = 16.5$  cm.

La diferencia entre los barnices 8001 y 8002 es en la flexibilidad. El barniz 8001 es un barniz duro, que después de un corto tiempo de operación pierde su termoplasticidad inicial. El barniz 8002 es un barniz muy flexible que

los demás termoplásticos incluso después de un tiempo prolongado a elevada temperatura.



**Figura 3.11** Características de Tensión -Corriente de los barnices 8001 y 8002.

### 3.2.5 Calmicaglass

#### 3.2.5.1 Composición

Se compone de papel de mica basado en moscovita calcinada impregnada con resina epoxi novolac termoendurecible y tela de vidrio como portador.

Tipo 2005 Lleva film de separación y es especialmente adecuada cuando la temperatura de transporte o almacenamiento es superior a 30 °C.

Tipo 0409 es idéntico al tipo 2005 pero sin film de separación y es especialmente adecuada para su uso en maquinas de encintado automático.

#### 3.2.5.2 Propiedades

Es un compuesto muy flexible, cual puede ser fácilmente aplicado tanto a mano como mediante maquina de encintado automático.

Después del curado en prensa de platos calientes, el aislamiento obtenido presenta unas excelentes propiedades dieléctricas, térmicas, mecánicas y químicas.

### 3.2.5.3 Aplicación

Es utilizado para el aislamiento de barras y bobinas de motores y generadores hasta los niveles más altos de tensión nominal.

También es adecuado para la fabricación de componentes moldeados como por ejemplo capuchones para conmutadores, tubos y cilindros.

### 3.2.5.4 Almacenamiento

Mínimo 6 meses a 20 °C

Mínimo 12 meses a 5°C

### 3.2.5.5 Datos técnicos

a) antes de prensado

Propiedad	Unidad			
Espesor nominal:	Mm	0.12	0.18	0.21
Sustancia total (gramaje)	g/m <sup>2</sup>	164	258	303
Papel mica:	g/m <sup>2</sup>	75	120	150
	%	45	46	49
Tela de vidrio	g/m <sup>2</sup>	24	33	33
	%	15	13	11
Contenido de resina	g/m <sup>2</sup>	65	105	120
	%	40	41	40
Resistencia a la tracción	N/cm	>70	>150	>150
Contenido de volátiles	%	<0.7	<0.7	<0.7

**Tabla 3.8** Propiedades antes de prensado del calmicaglass

b) condiciones de prensado (para obtener estabilidad térmica)

Temperatura: 130 –180 °C

Presión: 2 - 3 N/mm<sup>2</sup>

Tiempo: 0.5 - 8 horas

Ejemplo: 1hora a 160°C y 2 N/mm<sup>2</sup>. El curado completo se consigue después de 4 horas a 160°C

c) después del prensado: ( 4 Horas a 160°C)

Propiedad	Unidad			
Espesor nominal:	Mm	0.12	0.18	0.21
Espesor final	Mm	0.068	0.125	0.143
Numero de capas por mm		15	8	7
Densidad	g/cm <sup>2</sup>	1.9	1.9	1.9
Conductividad térmica	W/m°K	0.25-0.30	0.25-0.30	0.25-0.30
Coef. Ter. Exp. lineal	1/°K	10x10(-6)	10x10(-6)	10x10(-6)
Resistencia a la flexión	N/mm <sup>2</sup>			
23 °C		>200	>200	>200
150°C		>150	>150	>150
Rigidez Dieléctrica	KV/mm			
(medida sobre 0.3mm de espesor)				
23°C		>50	>50	>50
150°C		>45	>45	>45
Constante dieléctrica				
(23-150°C)				
Factor de perdidas		< 10x10(-3)	< 10x10(-3)	< 10x10(-3)
Dieléctricas 23°C		< 25x10(-3)	< 25x10(-3)	< 25x10(-3)
90°C		<100x10(-3)	<100x10(-3)	<100x10(-3)
155°C				
Clase Térmica F (155°C)				

**Tabla 3.9** Propiedades después de prensado del calmicaglass



## **CAPITULO IV**

### **FACTORES CRITICOS Y RECOMENDACIONES A CONSIDERAR EN LA REPARACION DEL ESTATOR DE UN GENERADOR SINCRONOS EN ALTA TENSION.**

#### **4.1 Generalidades**

Para la reparación de un generador síncrono de alta tensión se deberá tener en cuenta varios aspectos como las condiciones de las Bobinas estatoricas, Núcleo estatórico, Sistema de enfriamiento, partes de estructuras principales (ejes, rodamientos, y otros).

Para cada uno de estos aspectos se realizan diferentes pruebas de diagnostico para luego tomar las acciones correctivas en cada campo, uno de los aspectos más importantes que analizamos en él capítulo anterior es referente al comportamiento del campo eléctrico en el dieléctrico, en él capítulo presente analizaremos sus manifestaciones y trazar un plan para controlar los gradientes de potencial.

Las características del plan de Control de Gradiente de Potencial incluye desde la forma de la barra desnuda antes de que el aislamiento sea aplicado, así como la pintura semiconductora en el extremo de giro de la bobina. También es importante pero esta mas allá del alcance de este estudio los controles para protección del bobinado de las oscilaciones por descargas y desconexiones.

Este capítulo provee un estudio de los métodos de Control Gradiente de Potencial, poniendo particular énfasis en la supresión del efecto corona al final de la Bobina, incluyendo: 1) Distribución del esfuerzo voltaje en campos no homogéneos; 2) Efectividad de varios métodos de supresión corona.

## 4.2 Métodos de Supresión del Efecto Corona

Para lograr la Efectividad de estos métodos de supresión del efecto corona, comenzaremos analizando la distribución del esfuerzo de tensión en campos no homogéneos, para luego analizar las manifestaciones sobre los resultados de pruebas AC y DC.

### 4.2.1 La Barra Desnuda

Los radios de las esquinas de los alambres del conductor, y la vista de forma rectangular del paquete de la barra desnuda otorga un campo eléctrico con un área de alta esfuerzo en las esquinas.

#### 4.2.1.1 Radio de las Esquinas de los Alambres del Conductor

La figura 4-1 nos da la relación calculada entre  $E_{max}/E_{ave}$  y  $S/R$ , donde:

**E max** = Máxima tensión eléctrica en la esquina

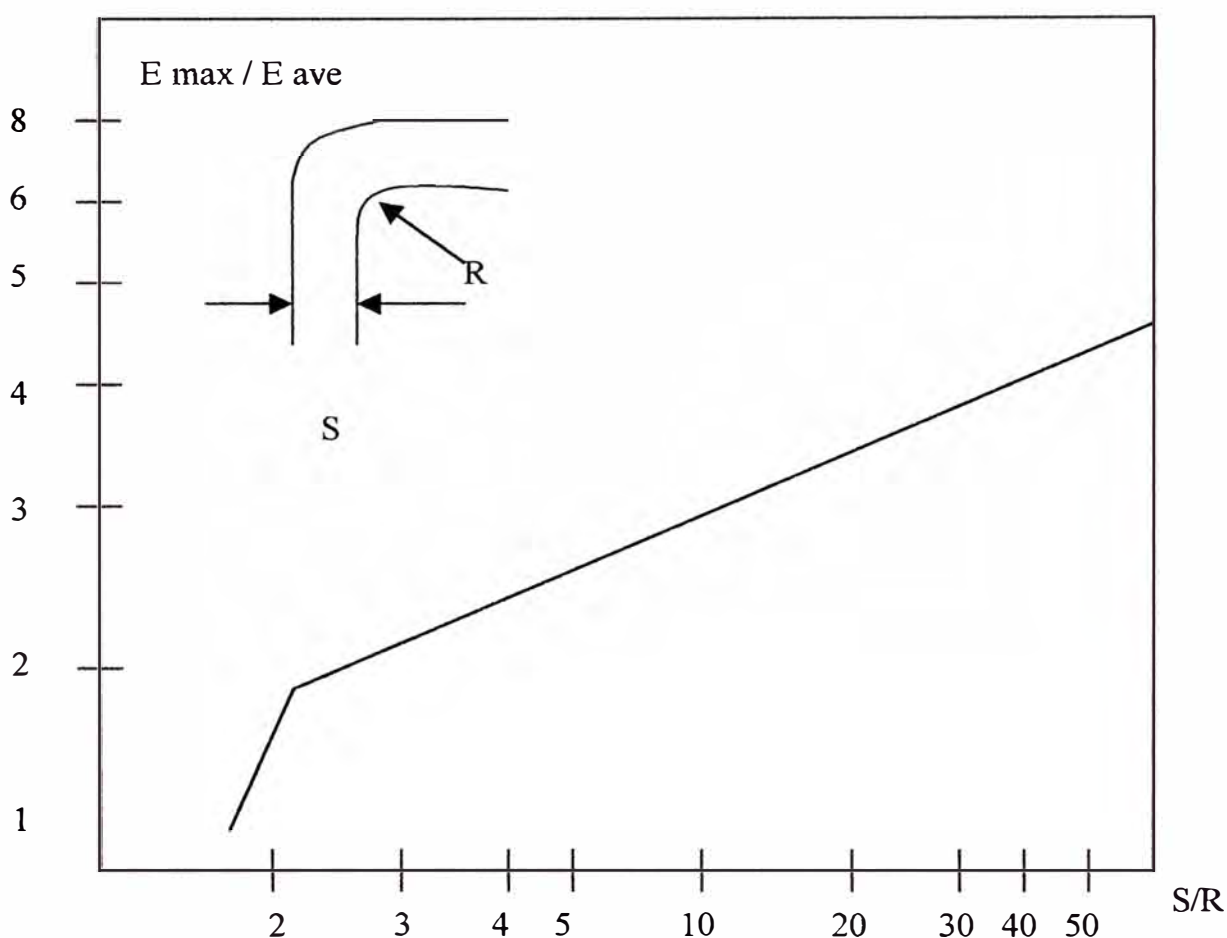
**E ave** = Tensión promedio basado en el voltaje aplicado dividido por S

**S** = Espesor del aislamiento en mils

**R** = Radio de la esquina en mils.

Para estos cálculos, se utilizó el teorema de los transformadores Schwarz – Christoffel, el sistema de aislamiento tomado para obtener una constante dieléctrica uniforme a través de ella. De la figura 4-1, los valores de  $E_{max}/E_{ave}$  para espesores de aislamiento de 180 y 240 mils y

radios de esquina de 31.62 y 125 mils son calculados, con el resultado de lista en la tabla 4.1 Para un radio de esquina de 125 mil(1/8") y un espesor de aislamiento de 180 mils, la tensión para la esquina es solo 1.1 de la tensión promedio; para un 31 mils (1/32") de radio y un espesor de aislamiento de 240 mils, la tensión para la esquina es 2.3 de la tensión promedio.



**Fig. 4.1** Relación entre  $E_{max}/E_{ave}$  y  $S/R$

La fig. 4.1 muestra el radio entre el máximo esfuerzo eléctrico y esfuerzo promedio vs. La razón del radio del espesor de aislamiento y el radio de la esquina del conductor. Calculo basado en el Teorema de Schwarz Christoffel.

En la tabla 4.1 se indican los valores del efecto del radio de esquina y espesor de aislamiento sobre el nivel tensión voltaje en la esquina de la barra desnuda.

<b>R mils (pulgadas)</b>	<b>E<sub>max</sub>/E<sub>ave</sub></b>	<b>E<sub>max</sub> / E<sub>ave</sub></b>
	S = 180	S = 240
31 ( 1/32" )	2.1	2.3
62 ( 1/16" )	1.65	1.8
125 ( 1/8" )	1.1	1.4

**Tabla 4.1** Valores de E<sub>max</sub>/E<sub>ave</sub> para diversos radios de esquinas de los alambres (R)

#### **4.2.1.2 Supresión del Efecto Corona en la Parte Interna de la Bobina**

La primera etapa en el gradiente interno es para usar un material de relleno para alisar la parte exterior del paquete de la barra desnuda, incluyendo la transposición de Roebel y las ranuras en forma de V, formadas entre los alambres. Antes de aplicar el aislamiento de tierra, se aplica un material de baja resistividad. El material usado incluye pintura semiconductor, lamina metálica, papel carbón y papel grafito. La pintura semiconductor es aplicada para aumentar la 200 V/mil vida de tensión de aguante para mas que un factor de 10% con menos del tiempo de falla. En general, el gradiente interno es únicamente usado para muy altas tensiones, tales como 26 kV. y mayores niveles.

### 4.2.2 Ranura del estator

La sección de la ranura de una bobina del estator se expone a tres formas de ataque del efecto corona: (1) La corona interna en los vacíos de las ranuras en forma de V y entre los alambres de la barra desnuda y el aislamiento a tierra (2). La corona interna dentro del vacío con el aislamiento y la pantalla tierra (3). La corona externa en los huecos de aire inevitables entre la superficie de la bobina y bordes del núcleo a los conductos y proyectando las laminaciones. En cada caso, La tensión eléctrica en los huecos de aire,  $E_a$ , es igual al esfuerzo eléctrico en el sólido dieléctrico,  $E_d$ , por su constante dieléctrica  $\epsilon_d$ .

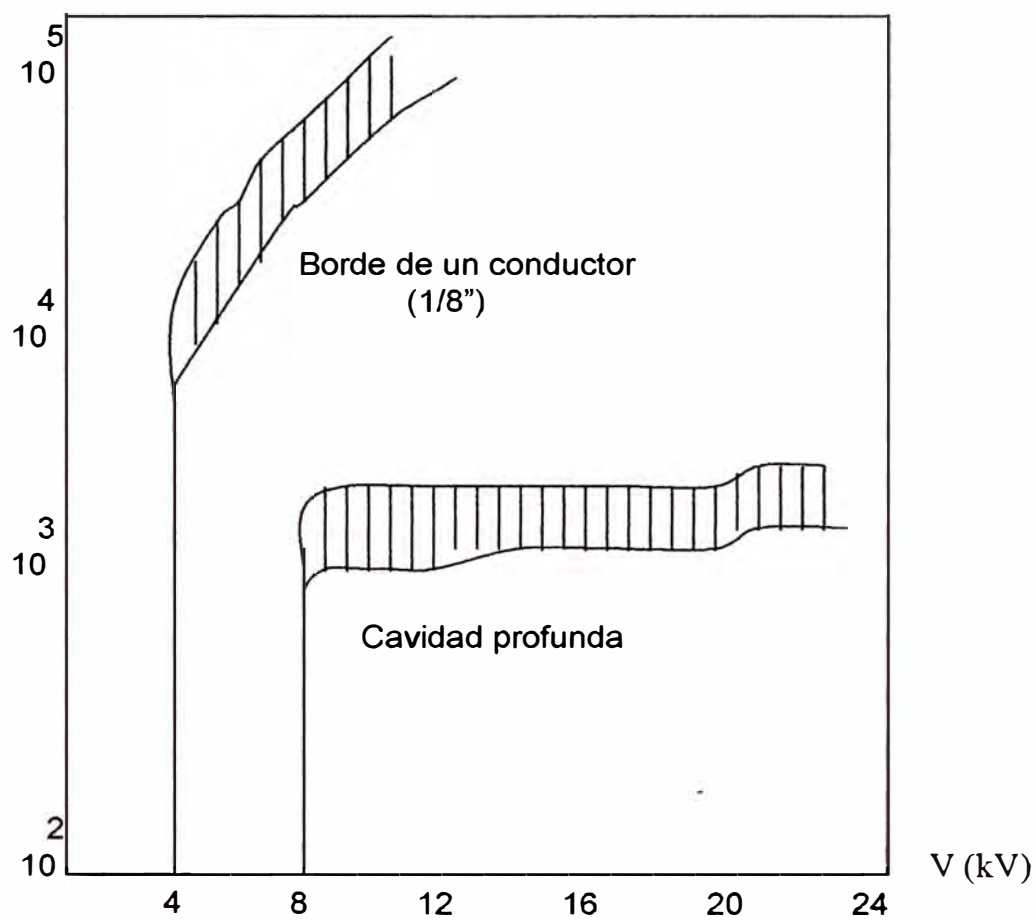
$$E_a = E_d \times \epsilon_d. \quad \dots\dots\dots (4.1)$$

Para un sistema de aislamiento de mica con constante dieléctrica  $\epsilon_d$  de valor 4, La tensión en el hueco de aire es cuatro veces la tensión en el dieléctrico sólido. La corona ataca en las ranuras de forma V entre la barra desnuda y el aislamiento de tierra es de principal preocupación para las bobinas de varias vueltas y es protegido contra esto usando aislamiento de mica. Con resina sintética, mica de hendidura o sistemas de aislamiento de papel mica, no se considera que la corona interna dentro del aislamiento contra tierra sea un problema importante. Donde las fallas eléctricas ocurren, el efecto corona externa ha sido la principal causa. Dakin ha encontrado que la descarga de corona externa arranca a más baja tensión que las descargas internas y su energía de pulso aumenta grandemente con la tensión

creciente, mientras la energía de pulso de descargas internas da un nivel relativamente bajo (figura 4.2).

Los métodos de suprimir las descargas externas en la ranura están incluidas en (1) La lamina de estaño en la ranura y tierra pero a un punto para prevenir corto circuito en las laminaciones de acero. (2) Pinturas Graphitic de baja resistividad. (3) Cintas de Asbesto. (4) Cinta de asbesto mas pintura de baja resistencia y (5) Una cubierta conductora. En general las bobinas para equipos rotativos en el rango de 6.6 kV. Requiere protección contra las descargas de ranura. Para prevenir eficazmente la descarga en la ranura sin poner en corto circuito la laminación de acero, la resistividad de la superficie de la cubierta que suprime la corona en la ranura debe estar en el rango de 2,000 a 75,000 ohmio por cuadrado, en casos donde un relleno lateral se requiere, también deberá tener una resistividad baja de superficie para mantener el contacto eléctrico entre la bobina y los lados de la ranura. La tela de vidrio semiconductor conveniente deberá tener una resistividad de superficie de 2,500 a 20,000 ohmio por cuadrado. La resistividad de superficie es definida por ASTM D 257-66 es numéricamente igual

Picocoulomb



**Figura 4.2** Comparación de Pulso de corona vs. Tensión aplicada en el borde de un conductor y en una cavidad sellada.

para la resistencia superficial entre dos electrodos formando oposición lados de un cuadrado; el tamaño del cuadrado es inmaterial.

#### **4.2.3 Extremo de Codo de Bobina**

Las descargas corona en el extremo del bobinado de las bobinas de alta tensión son de tres tipos: ( 1 ) A lo largo de la superficie de la bobina hasta el extremo de la pintura de ranura; (2) Entre bobinas adyacentes de diferente fases; (3) Entre conexiones terminal de medio giro bobina y para tierra. Cada uno de estos problemas será considerado por separado líneas abajo. Aunque el arrastre superficial no es considerado en detalle en este estudio, el efecto de cualquier solución al problema de descarga por corona es susceptible al arrastre (tracking) debe ser considerado.

##### **4.2.3.1 Descargas al Extremo de la Ranura**

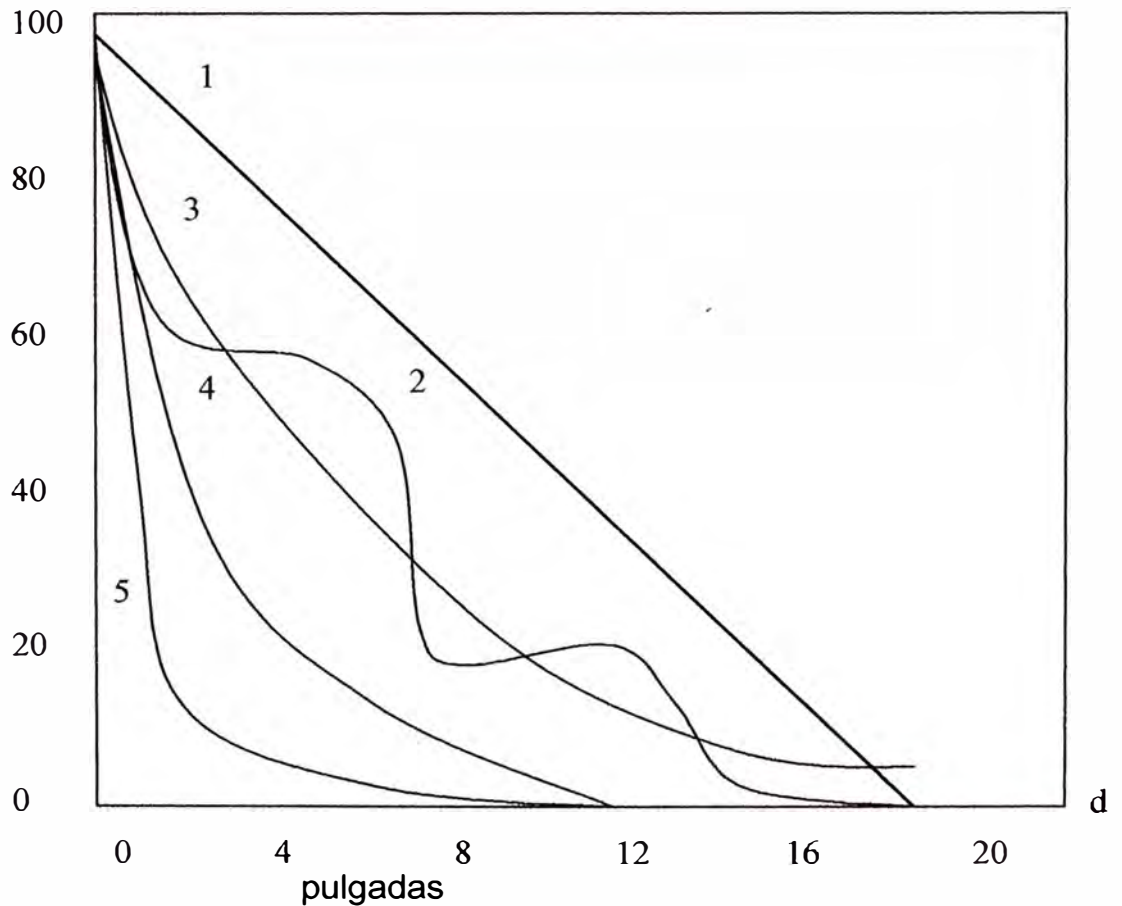
Extendiendo la pintura de ranura de baja resistividad de  $\frac{1}{2}$  - 1 pulgada, fuera del núcleo es suficiente prevenir las descargas corona en el aire entre el núcleo y la superficie de la bobina para equipos rotativos sobre los 10 kV. Sobre este rango, el gradiente de tensión entre el extremo de la pintura de ranura y la superficie de la bobina es altamente grande para causar un efecto corona en forma de anillo. A estas alturas, la pintura de ranura esta muy cerca del potencial de tierra, y la muy alta resistividad de la superficie de la bobina es cargada capacitivamente casi todo la tensión del conductor. La carga sobre la superficie de la bobina puede ser discutida con mas detalles en la sección sobre descargas entre bobinas. Varios métodos que han reducido exitosamente el gradiente de tensión a lo largo de la superficie por debajo de la tensión de ruptura del gas son descritos abajo y listados en la



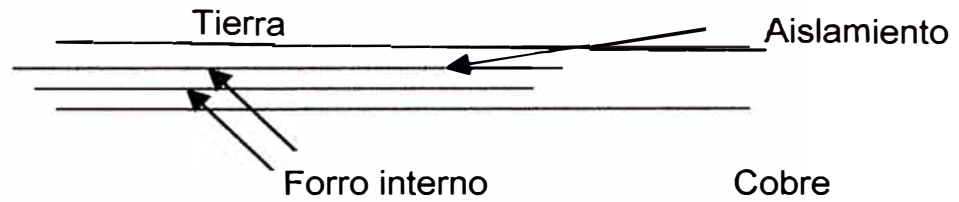
tabla 4.2. El objetivo de cada uno de estos métodos es distribuir la tensión uniformemente a lo largo de la superficie del área graduada. Como es ilustrado por la curva 1 en la figura 4.3, la curva 5 en la figura 4.3 muestra la pendiente extremadamente alta que ocurre al final de la pintura de ranura en la ausencia de la protección corona.

### Tensión

#### a través del aislamiento (%)



**Fig. 4.3** Distribución de la tensión a lo largo de la superficie del área graduada.



El calculo de la distribución de tensión después del final de la ranura, para diferentes combinaciones de forros internos y resistencias externas.

Curva 1 Distribución de tensión deseado

Curva 2 Distribución de tensión con único forro interno

Curva 3 Distribución de tensión con forro interno y resistencia externa proporcional a la capacidad de la superficie externa del forro

Curva 4 Distribución de tensión con un valor particular de resistencia externa única.

Curva 5 Distribución sin protección contra la corona.

<b>Método de graduación de tensión</b>	<b>Longitud (Pulgadas) CSV<sup>a</sup> (kV)</b>	
<b>Pintura semiconductora</b>	2	>8
	5	>30
<b>Pintura Semiconductora</b>		
En armadura de vidrio	6	9.5
En armadura de asbesto	6	>20
<b>Cuatro Pinturas Semiconductoras</b>	18	>70
<b>Dos Forros Semiconductores</b>		
Con puesta a tierra	18	>90
<b>Mas Forros Semiconductores</b>		
Pintura Semiconductora	24	>155
<b>Lamina Metálica -2</b>	-	39
-4	-	25
<b>Cuatro laminas metálicas a mas</b>		
Pintura semiconductora	-	50

CSV<sup>a</sup> Tensión de inicio del efecto corona, determinado en un cuarto oscurecido

**Tabla 4.2** Graduación de Tensión con pinturas al extremo de la bobina.

#### 4.2.3.1.1 Pintura Corona Semiconductora

Cuando una simple pintura semiconductora es empleada, allí son cinco factores a considerar: (1) Resistividad de superficie, (2) Longitud de la sección pintada, (3) La dependencia de voltaje de pintura semiconductora, (4) superficie para pintura que es aplicada, (5) calor generado en la cubierta.

Se tiene el propósito de desarrollar una ecuación para el cálculo de la distribución de potencial a lo largo de la superficie de la bobina en el área graduada.

$$\frac{V_p}{V_a} = \left[ \frac{\sinh^2 ax + \cos^2 ax}{\sinh^2 al + \cos^2 al} \right]^{1/2} \dots (4.2)$$

**Donde:**

**V<sub>p</sub>:** Tensión en cualquier punto P de la superficie del supresor corona

**V<sub>a</sub>:** Tensión total que deberá ser graduado.

**a:**  $\sqrt{\pi fCR}$

**l:** Longitud de la sección pintada

**C:** Capacitancia del aislamiento

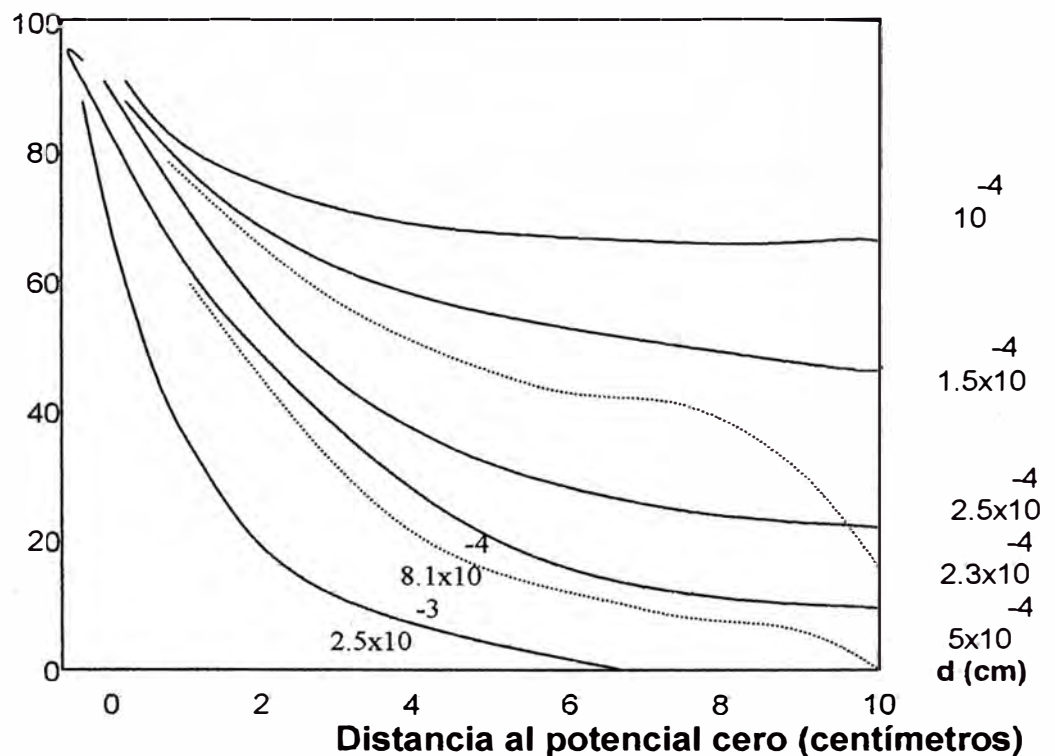
**R:** Resistencia de la superficie

Usando esta ecuación, obtenemos el cálculo de la distribución de potencial similares para valores medidos como muestra la figura 4.4. La curva en la figura 4.4 ilustra estos factores: (1) Si se usa una pintura con demasiada alta resistividad ( $CR = 2.5 \times 10^{-3} \Omega F$ ), a lo largo existe

todavía un gradiente de tensión en la juntura de la pintura de ranura y la pintura de la corona semiconductor (2) Si se usa una pintura con baja resistividad ( $CR = 10^{-3} \Omega F$ ) no es bastante de la tensión que es graduada con la pintura corona. En cualquier caso, la descarga corona puede ocurrir.

Esto también se evidencia en la figura 4.4 esto así el beneficio es muy pequeño usando una longitud pintada mayor que 6 cm. La efectiva distancia gradiente puede ser extendida un poco usando una pintura semiconductor con una característica grandemente no lineal de Tensión –

**Tensión a través  
del aislamiento (%)**



**Figura 4.4** Distribución de la tensión en función a la longitud pintada en la figura 4.4 podemos observar la distribución de tensión para la prevención del efecto corona, pintando la superficie.

Los Valores indicados sobre las curvas son CR valores en  $9F$ . Las líneas continuas son calculadas, las líneas punteadas son medidas con un voltímetro de tubo de vacío.

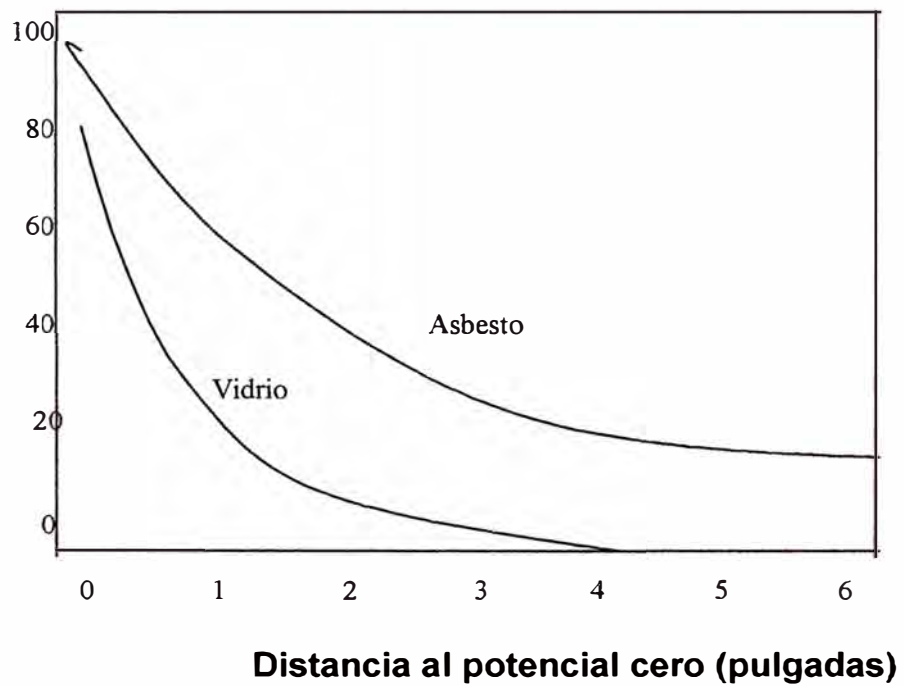
Resistencia y/o cinta de asbesto ferroso como la superficie debe ser pintado. La ventaja de la cinta de asbesto sobre la cinta de vidrio usando una similar pintura de la corona, con un relativo característica lineal Voltaje – Resistencia, es ilustrada en la figura 4.5. Donde se encontró que el voltaje de arranque (CSV) era solo de 9.5 kV., para el sistema cinta de vidrio, pero excedía 20 kV., para el sistema cinta de asbesto con una resistividad de superficie de 1650 megohms por cuadrado (medido para 15 kV dc.)

Otro factor que no puede ser pasado por alto por buscar un sistema de control de gradiente de tensión es el calentamiento generado debido al flujo de corriente cargada a través del pintado de la superficie semiconductor para tierra (pintura de ranura). Únicamente se vuelve un problema durante la prueba de hi – pot de bobinas de muy alto voltaje (> 20 kV.), cual es dado en el rango de  $1.3 \times (2E + 1000)$  a  $1.6 \times (2E + 1000)$  Voltios donde  $E =$  Voltaje de la maquina. Cuando esto ocurre, el sobrecalentamiento puede degradar la pintura corona y decrecer la efectividad de la protección corona.

En algunos casos, el sobrecalentamiento puede ser superado obteniendo la resistencia de superficie deseado usando una capa delgada de pintura corona, Una segunda forma es de usar temporalmente cinta de asbesto ferroso durante la prueba, que se reemplaza entonces con un supresor pintura corona fresca capaz de resistir la maquina la prueba hi-pot de  $2E + 1000$  voltios sin sobrecalentamiento. Un problema con el diseño de un supresor de corona para reunir requerimientos de prueba hi –pot de bobina es que este supresor diseñado debe dar una distribución de tensión

casi ideal para una prueba de bobina de 53 kV., estaría cumpliendo lejos del ideal para una tensión de operación cercana a 20 kv.

### Tensión a través del aislamiento



**Figura 4.5** Distribución de tensión a lo largo de la pintura graduante sobre la superficie de la barra de prueba.

#### **4.2.3.1.2 Pintura Semiconductora Múltiple**

Usando una serie de cuatro pinturas semiconductoras con resistencias de superficie incrementadas desde la pintura de ranura a 18 pulgadas hacia fuera. Laffon y Calvert ha podido eliminar corona a 70 kV.

#### **4.2.3.1.3 Forro semiconductor o Lamina metálica dentro de la tierra.**

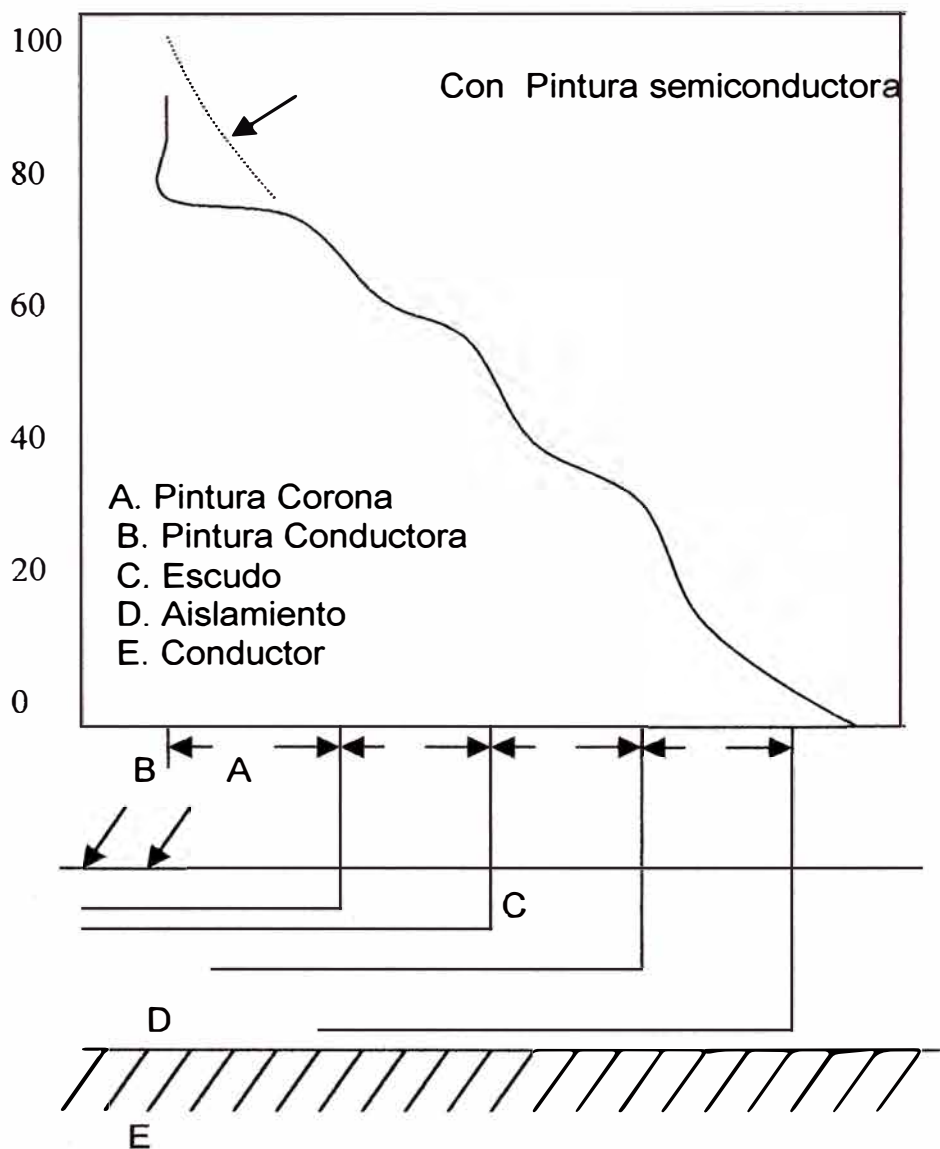
Otro modelo más exótico de diseño de supresor corona para eliminar corona y sobrecalentamiento durante la prueba de hi pot de la bobina están también listados en la tabla 4.2. Este método, que es único considerado para muy altas tensiones de 24 kV. mas, incluye incorporado forro semiconductor o lamina metálica dentro del aislamiento de tierra, con o sin pintura semiconductoras. La curva 2 de la figura 4.3 muestra la mejora usando dos forros (capas de pintura semiconductoras de baja resistividad) sobre el uso de una simple externa pintura semiconductoras (curva 4). Las áreas de alto esfuerzo en Curva 2 son eliminadas por una combinación de tres pinturas semiconductoras externas con dos forros semiconductores. Esta combinación de sistemas de gradiente de 24 pulgadas y más 18 pulgadas de libre escurrimiento distancia al final se registra haber resistido 150 kV. Sin efecto corona.

Las laminas metálicas están dentro de la tierra como una capa sobrepuesta de cinta consistente de una y media mil de lamina metálica y una mil de apoyo aislante. La cinta sobrepuesta en espiral reduce el calentamiento debido a la corriente perdida de eddy en la lamina. Se registraron una tensión de arranque corona de 39 kV usando dos laminas. Hyakutake and Ohashi incrementaron el Voltaje de Arranque de Corona a 50



kV usando cuatro laminas metálicas dentro del aislamiento de tierra mas una longitud corta de pintura semiconductor externa. El efecto beneficio de esta pintura es visto en él calculo de curvas de distribución de tensión mostradas en la Figura 4.6.

### Tensión a través del aislamiento



**Figura 4.6** Distribución de potencial de la superficie de la bobina con los escudos internos, las líneas entrecortadas es para el sistema gradiente incluyendo pintura corona externa.

### 4.2.3.2 Descargas Parciales Entre Bobinas Adyacentes de Diferentes Fases

Un segundo lugar probable de descarga corona es entre bobinas adyacentes de diferentes fases. La diferencia de potencial es alta mas allá de supresor de corona y durante la prueba AC de hi-pot sobre la maquina. Durante esta prueba, una fase es probada para  $2E + 1000$  Voltios mientras que las otras dos fases son puestas a tierra. Para una maquina de 24 kV. , La diferencia de voltaje entre bobinas de diferente fase es 49 kV.

Esta sección puede ser dividida en tres partes: (1) Entrehierro requerido para prevenir corona de bobina a bobina asumiendo un campo uniforme, (2) Factores de distorsión de campo (3) Tratamiento de superficie usados sobre el final del bobinado.

#### 4.2.3.2.1 Entrehierro Requerido para Prevenir Corona

El esquema del aislamiento y diagrama equivalente de bobinas adyacentes del final del bobinado son ilustradas en la Figura 4.7, donde  $d$  es el espesor del aislamiento de tierra y  $t$  es le tamaño del entrehierro entre bobinas. Asumiendo un campo uniforme, las tres placas de aislamiento (aislamiento, aire, aislamiento) pueden ser considerados como tres capacitores con alto volumen de resistividad conectados en serie, expresándose las relaciones siguientes.

$$V = 2 V_i + V_a \quad \dots\dots\dots(4.3)$$

$$V_i = E_i \times d$$

$$V_a = E_a \times t$$

$$\epsilon_i E_i = \epsilon_a E_a = \text{aprox. } E_a$$

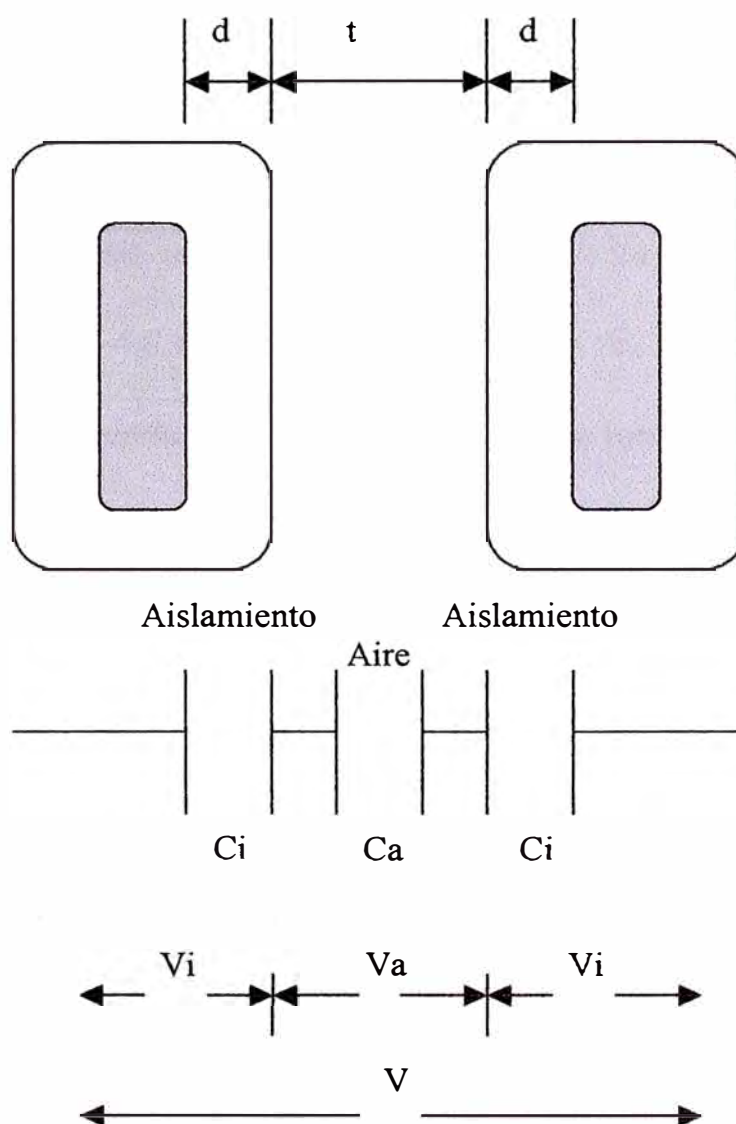
**Donde:**

**V** Tensión entre conductores

**V<sub>i</sub>** Tensión por cada aislamiento

**V<sub>a</sub>** Tensión en el entrehierro

**E<sub>i</sub>** Campo eléctrico en el aislamiento



**Figura 4.7** Esquema de aislamiento y diagrama de circuito equivalente para dos bobinas adyacentes.

**E<sub>a</sub>** Campo eléctrico en el enterhierro

**ε<sub>i</sub>** Constante dieléctrica o permitividad relativa del aislamiento

**ε<sub>a</sub>** Constante dieléctrica del aire

La constante dieléctrica del aire es aproximadamente igual a 1, de estas ecuaciones, la tensión en el aire es relacionada con la tensión de conductores (V) por la ecuación siguiente:

$$V_a = V \frac{1}{1 + \frac{2d}{\epsilon_{ixt}}} \quad \dots 4.4$$

Para un alto voltaje al final del bobinado con 0.24 pulgadas de espesor de aislamiento y  $\epsilon_i = 4.0$  los valores de  $V_i$ ,  $E_i$ ,  $V_a$  y  $E_a$  para varios tamaños de entrehierro están dadas en la tabla 4.3 para una tensión de prueba de 49 kV.

<b>T (pulgadas)</b>	<b>V<sub>i</sub> (kV)</b>	<b>E<sub>i</sub> (V/mil)</b>	<b>V<sub>a</sub> (kV)</b>	<b>E<sub>a</sub> (V/mil)</b>	<b>CSV (kV)</b>
0.5	4.7	19.6	39.6	79.2	25
1.0	2.6	10.9	43.7	43.7	38
1.5	1.8	7.5	45.4	30.1	49
2.0	1.4	5.8	46.2	23.1	60
2.5	1.1	4.6	46.8	18.7	70

CSV Tensión de Inicio Corona en el aire a una presión de 1 atmósfera

**Tabla 4.3** Valores de tensión en el aislamiento y el entre hierro para diferentes "t".

También incluido en la tabla 4.3 está la tensión de inicio del efecto corona (CSV) se determinó que entre 2 superficies de bobina aislada cruzada en ángulos rectos en el aire a una presión de 1 atmósfera (figura 4.10). Por comparación  $V_a$  con CVS, esto es evidente que ocurrirá una descarga corona durante una prueba hi pot 49 kV, en el aire debajo de una distancia de entrehierro de 1.5 pulgadas. Los daños causados en el entrehierro de 1 pulgada son despreciables durante una prueba hi pot de 1 minuto, desde el nivel de tensión en el entrehierro,  $E_a$ . Es único 43.7 V/mil. Esto puede ser visto en la figura 4.11, cual muestra la relación entre energía corona relativa por ciclo para nivel de esfuerzo.

Más importante es la reducción o eliminación de condiciones de operación bajo corona. La CSV de una distancia de entrehierro de 0.5 pulgadas es 25 kV, Así pequeño si cualquier descarga corona debe ser esperado entre dos bobinas adyacentes de 24 kV unidad usada como en el ejemplo anterior.

Como indica la Figura 4.8, La CSV es mayor a la medida que se incrementa la presión a 30 – 60 psig atmósfera de hidrogeno en el cual los modernos turbogeneradores operan.

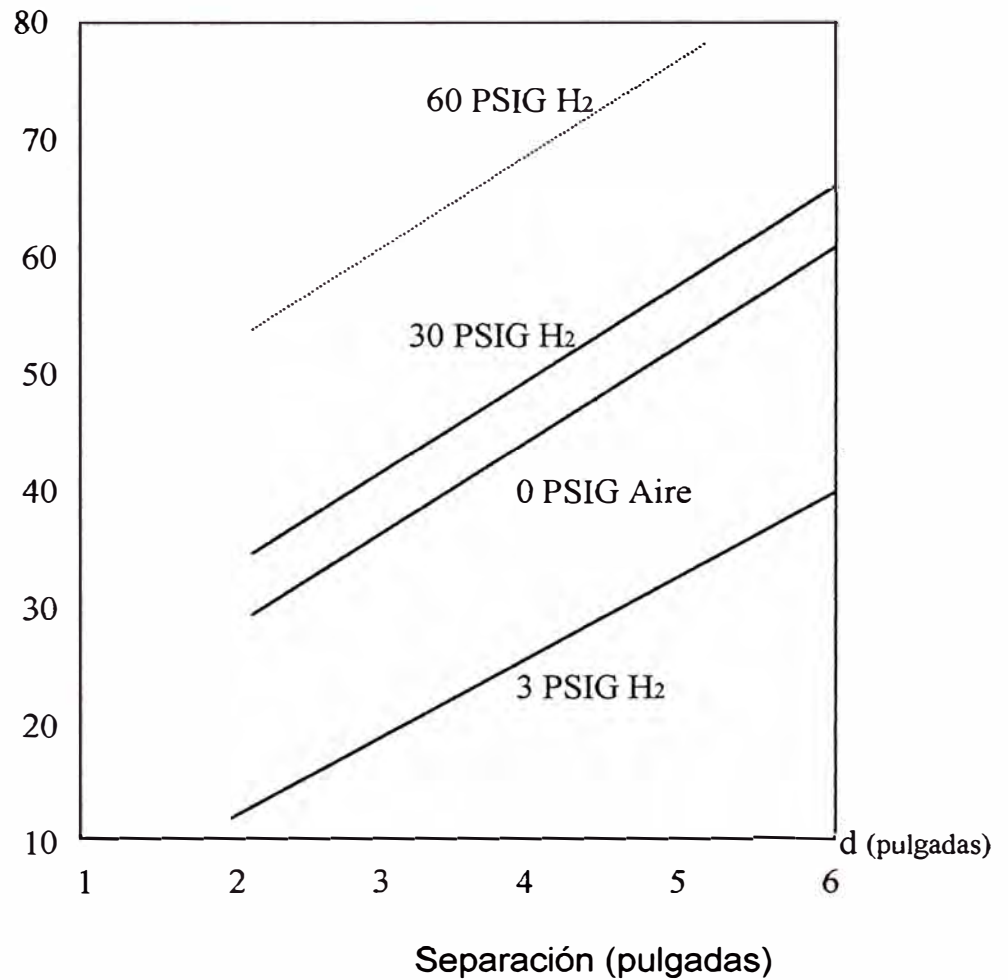
Otro punto de interés es que el aislamiento sujeto a las descargas corona en el hidrogeno tiene cuatro veces mas que la vida de aislamiento similar expuesto a la misma energía de descarga en el aire.

El efecto de la presión de gas sobre CSV es mostrada claramente por la curva (Figura 4.9). La tensión de inicio del efecto corona es una función del producto del tiempo de presión y tamaño de del entrehierro. Esta relación

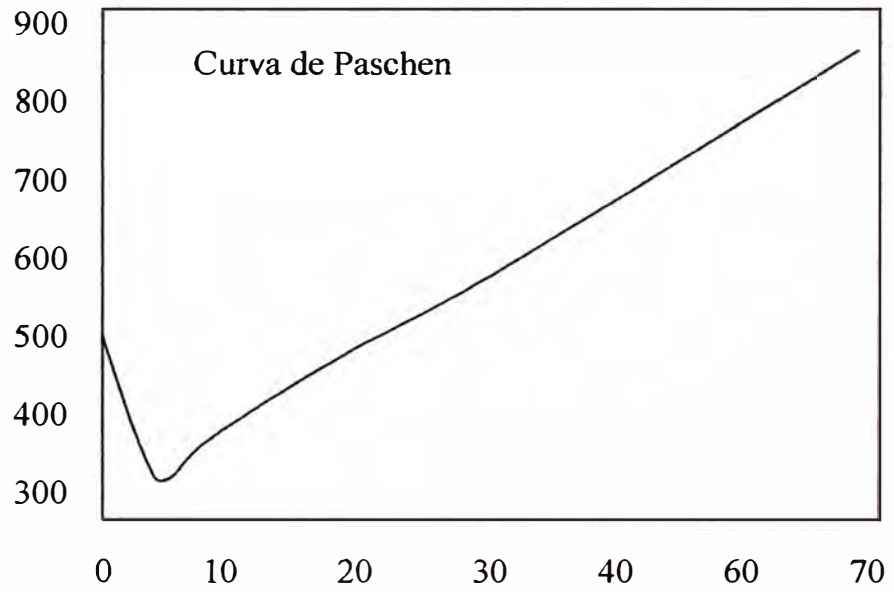
explica la formación de arcos, que incluso ocurren en los entrehierros relativamente grandes cuando la presión baja, como en el avión a una altitud grande.

El valor de  $V_i$  indicado en el Tabla 4.3 ilustra el hecho mencionado que una superficie de aislamiento con una alta resistividad superficial hacia tierra y una larga separación de aire a la tierra más cercana, logra un voltaje casi igual a través del conductor. Por ejemplo, a 2 pulgadas de entrehierro lleva una tensión diferencial cruzado en el aislamiento de únicamente 1.4 kV y una tensión superficial de 46.2 kV para un conductor de voltaje de 49 kV. Este factor, sin embargo, no debe ser usado como una justificación para salir con las conexiones desnudas, porque cortos circuitos entre conexiones de fases adyacentes pueden ocurrir en servicio cuya causa de falla seria conexiones desnudas. Mientras simplemente aplicar una media del rango de voltaje por el aislamiento de cada conexión aislada.

**Tensión antes ruptura (kV)  
(tensión eficaz)**



**Figura 4.8** Diagrama de la tensión de martilleo vs. La distancia prueba de Aire e Hidrogeno para estatores cuyas terminal de bobinas está refrigerado con hidrogeno.

**Tensión AC antes ruptura (pico)****Producto distancia y presión en la separación (mmHg. cm)**

**Figura 4.9** Potencial de chisporroteo en aire como función de la presión y la distancia de entrehierro para bajos Valores.



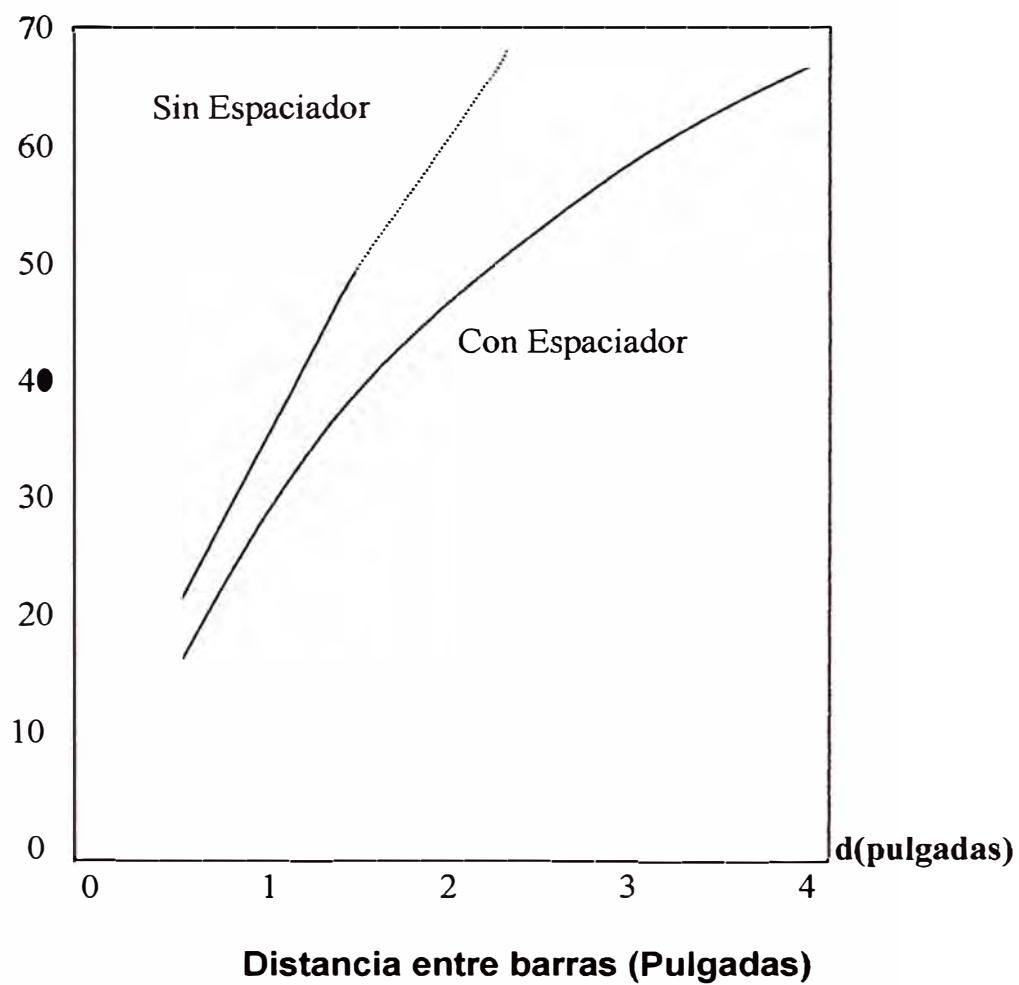
#### **4.2.3.2.2 Factores de Distorsión del Campo**

Los factores de distorsión del campo son de tres tipos: (1) Radio de las esquinas de los alambres del conductor, (2) Superficie áspera y (3) Bloques más grandes (usado entre las barra para fortalecer mecánicamente al final de bobinado). Como antes de la discusión, los alambres del conductor con un relativo pequeño radio puede distorsionar el campo en esta área, este efecto, sin embargo, esta principalmente cerca al conductor y subsecuentemente el aislamiento en esta área esta normalmente bajo una tensión pequeña, Esto no debe ser un mayor factor. Se observo que la CSV de una superficie de bobina extremadamente lisa, puede soportar mas de dos veces la CSV de una superficie rugosa. La bobina lisa que era arenada y barnizado cinco veces tenia 1.2 de CSV de veces de las bobinas de producción estándar. Preferentemente erosión o carbonización de las manchas rugosas podrían explicarse estas observaciones, en general, la magnitud de la descarga corona para el voltaje de trabajo decrece durante los primeros cinco años de la vida de la maquina antes de aumentar preferencialmente después, cerca de la línea final del bobinado. La presencia de bloques más grandes decrece la CSV entre la superficie de las bobinas a 73% del valor obtenido para 2" de entrehierro sin bloques más grandes (Fig. 4.10).

#### **4.2.3.2.3 Tratamiento de la Superficie Usada Sobre el Final del Bobinado**

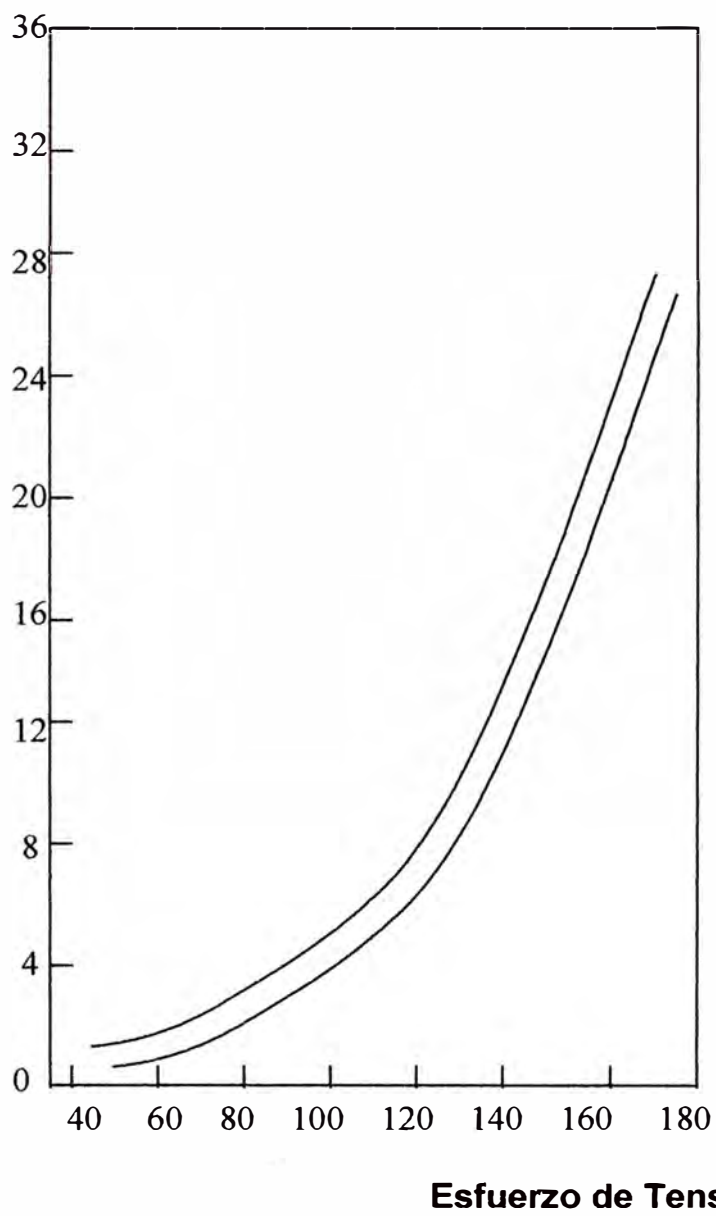
En muchos casos una distancia de entrehierro suficientemente larga o bien todavía disponer hidrogeno a alta presión para evitar serias descargas corona en el final del bobinado incluso con bloques más grandes y una relativa rugosidad de superficie. Para adicionar la protección corona, la superficie de las bobinas son pintadas con esmaltes conteniendo compuestos

**Tensión eficaz de inicio  
corona (kV)**



**Figura 4.10** CSV Tensión de inicio corona entre aislamiento de superficie de bobina con o sin espaciador

**Energía por ciclo  
Corona**



**Figura 4.11** Incremento de la energía de corona con el incremento de la Tensión aplicado

pigmentos inorgánicos para dar a la superficie una alta resistencia al deterioro por corona. El uso de esta pintura semiconductora con una resistividad de superficie de 5 a 40 megohmios por cuadrado se ha registrado como benéficos en situaciones especiales donde la distancia existente de bobina – bobina es pequeña. Esta pintura es usada en el final de la bobina incluyendo los bloques grandes, encintado cruzado, conexiones de anillo y anillo soporte. Un barniz de aislamiento es usado sobre la pintura semiconductora para proveer una protección adicional contra el deterioro. Existen dos preocupaciones cuando se usa la pintura semiconductora sobre el final del bobinado (1) El arrastre en los bloques más grandes, (2) La posibilidad de una severa corona entre los bloques grandes y la bobina de que estaba separado por fuerza mecánica del final de bobinado. Con respecto al arrastre, una pintura semiconductora puede beneficiar para eliminar la alta concentración del esfuerzo eléctrico en áreas que son el núcleo de origen del arrastre. También queda claro que una resistencia puede llevar a calentar la capa, llevando a carbonizar el arrastre.

#### **4.2.3.3 Descargas Entre Terminal de Conexiones de Medio Vuelta a Tierra**

La Corona no es un problema mayor para las conexiones terminal de enfriamientos convencionales de bobinas medio giro, sin embargo, el entrehierro entre bobinas son poco grandes en esta área. En adición. Mas que un suficiente espacio es normalmente disponible entre la conexión y el final de campana para prevenir corona durante la operación de la maquina. El final de campana son removidos durante las pruebas, para que no presente problemas durante la prueba de sobrevoltaje hi-pot.

Se han investigado el problema de la descarga corona y arrastre en las conexiones de bobinas estáticas enfriados con hidrogeno con el tubo de enfriamiento abierto a las conexiones para proporcionar acceso para el enfriamiento de gas. Para las bobinas adyacentes de diferente fase, La diferencia de voltaje entre un tubo de enfriamiento metálico es la prueba de voltaje total, con el entrehierro que es la única barrera de aislamiento. El tamaño del entrehierro se aumentara a un adecuado tamaño atando una capa de aislamiento que se extiende mas allá del tubo de refrigeración, embudando en gas refrigerante dentro del tubo.

## CAPITULO V PRUEBAS ELECTRICAS

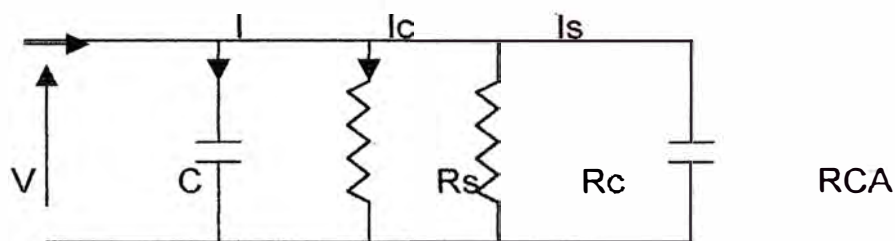
### 5.1 Pruebas de Aislamiento

La continuidad de la performance de un equipo eléctrico depende en gran parte de la performance de su sistema de aislamiento.

#### 5.1.1 Pruebas D.C.

La prueba DC es la prueba más común usada por la industria en evaluación de la integridad del aislamiento; IEEE std 95 – 1977 cubre las pruebas aceptación de nuevos equipos o en el campo después del montaje y prueba mantenimiento de rutina de maquinas que están en servicio. Este estudio discutirá los diferentes métodos de prueba d-c y la interpretación de los resultados de estas pruebas.

El sistema de aislamiento de un bobinado puede ser representado por un circuito equivalente (figura 5.1) de una combinación de capacitores y resistores.



**Figura 5.1** Circuito equivalente de un aislamiento aislamiento

**Donde:**

**C** Condensador Placa Paralela que tiene Constante Dieléctrica  
Del material aislante.

**Rs** Resistencia de fuga superficial

**Rc** Resistencia de aislamiento conducción

**RCA** Circuito de absorción

**5.1.1.1 Tipos de Prueba d-c**

Las pruebas D-C son comúnmente usadas porque la portabilidad de la prueba y la naturaleza no destructiva de la prueba esta hecha bajo una condición controlada. Los más útiles métodos pruebas d-c están listadas como sigue:

Prueba de resistencia de Aislamiento

Prueba de Índice de Polarización

Prueba Hi – Pot D-C

Prueba de sobre voltaje controlado (prueba de etapas)

Prueba de Sobrevoltaje tiempo graduado.

Prueba Rampa D-C

**5.1.1.1.1 Prueba de resistencia de aislamiento.**

La prueba comúnmente conocida como la prueba del Megger. Esta es una prueba No Destructiva diseñada para medir la Resistencia Dieléctrica. Aquí están los diferentes rangos de voltaje para varias aplicaciones.

Estos voltajes son 500 voltios, que nosotros sugerimos para unidades 550 VAC o menos, y también para campos D-C; él más próximo es 1000 voltios d-c para probar unidades de 550 va-c a mas hasta 4000 va-c. Pruebas

megger encima de los 10 kV. Están comercialmente disponibles para especiales aplicaciones.

Una regla elemental para valores mínimos de resistencia en megaohms debe ser aproximadamente igual al voltaje de la maquina en kilovoltios más 1 megaohm.

El tiempo para esta lectura debe ser de 1 minuto después de aplicar el voltaje. Para una simple fase de un bobinado de tres fases , multiplicar el numero megaohm anterior por dos.

Las maquinas en buenas condiciones tiene lecturas de resistencia de 10 a 100 veces estos valores. Por ejemplo, una maquina 13.8 kV en servicio debe tener un mínimo valor de 14.8 Mohm., comparando con un bobinado nuevo deba tener 150 a 150 Mohm.

#### **5.1.1.1.2 Prueba de Indice de Polarizacion (I.P.)**

Una cantidad dimensional usada a menudo para expresar la forma general de curva de corriente – tiempo es el índice de polarización, que es el radio de la corriente medida a un minuto y la corriente medida en 10 minutos. Cuando un bobinado esta sucio o húmedo o ambos puede tener un índice bajo de polarización. Como una condición para que el bobinado este bien, el índice de polarización debe ser grande. Numéricamente el valor del índice de polarización es afectado grandemente por la corriente de fuga. Si la corriente de fuga es alta, el I.P. puede aproximarse a 1. Si el bobinado esta limpiado y secado y la corriente de fuga baja, La corriente cargada debe ser el factor primario afectando el I.P. , En este caso, la corriente de carga debe cambiar grandemente con el tiempo.



Así el I.P. puede ser alto. Si el I.P. es mayor que 2, usualmente indica bueno, limpiado y secado el aislamiento.

Sin embargo, debe notarse que alguna situación inusual puede ocurrir. Por ejemplo, Un aislamiento viejo lavado, seco y quebradizo como la tela barnizada puede estar cerca al final de su vida y todavía I.P. da un valor 5 debido a la falta de cualquier gran cantidad de corriente de fuga. por otro lado, Algunos de los nuevos sistemas de resinas epóxicas y poliéster pueden dar un bajo valor de I.P. Cuando el bobinado es nuevo con un sistema de resina incompleto.

#### **5.1.1.1.3 Prueba Alta tensión D.C.**

El bobinado para esta prueba debe ser limpiado y preparado como estipula la IEEE 95. Esta prueba de producto de aceptación debe ser de  $1.7 \times (2E + 1000)$  voltios para nuevos bobinados. Para equipos que están en servicio, la tensión de prueba depende del tipo, condiciones de aislamiento, historial de equipos, servicio de rehabilitación, entre otros. En general frecuentemente la tensión de prueba esta entre 125% y 150% del voltaje de la maquina, la tensión d-c para prueba de mantenimiento es calculada multiplicando la tensión anterior por 1.7.

La aplicación de la tensión de esta prueba debe ser gradual; se debe evitar exceder la prueba máxima y evitar innecesariamente el disparo del dispositivo de sobrecorriente en la prueba que pueda introducir indeseables ondas.

La duración de las pruebas de aceptación o mantenimiento deberán ser de 1 minuto. Empezar a cronometrar cuando la tensión de prueba se alcanza, y la reducción de la tensión de prueba no debe ser abrupta.

La falla completa es usualmente indicada por una descarga capacitiva intempestiva en el punto de falla. Sin embargo, hay tiempos cuando el potencial de falla es indicado por un cambio brusco anormal en la corriente de fuga observada.

Después de la prueba d-c, el bobinado debe ser puesto a tierra cuatro veces el tiempo de carga para asegurar que el bobinado este totalmente descargado.

#### **5.1.1.1.4 Prueba de Sobre Voltaje Controlado D.C.**

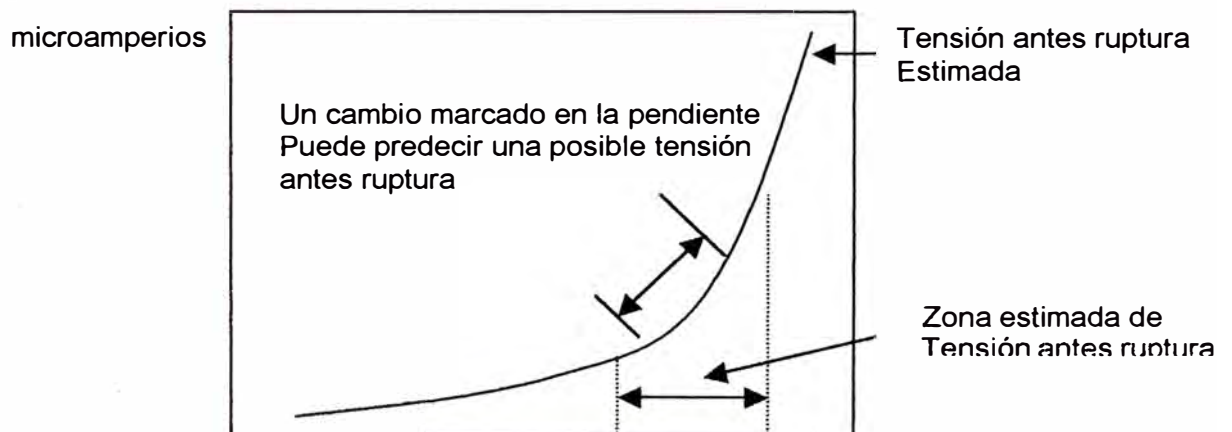
Esta prueba a veces se refiere como una prueba fuga d-c o prueba de tensión por etapas. La tensión de prueba d-c es incrementada de una manera específica, durante que el tiempo de la corriente medida se observa. Este tipo de prueba provee un registro de las condiciones del bobinado para el presente y usos futuros y puede permitir predicción de la tensión antes ruptura.

Se recomienda que la tensión inicial sea aplicada y sostenido constante hasta el índice de polarización sea determinada y que el voltaje entonces se incremente a un valor que no exceda el 3% del nivel de prueba final en cada minuto. El máximo voltaje recomendado es 125% a 150% del voltaje alterno nominal, veces 1.7 El dato obtenido para el final de cada etapa debe ser dibujado inmediatamente durante la prueba. Figura 5.2 es una tendencia de prueba voltaje etapas.

Hay que tener cuidado la tensión antes ruptura no puede ser siempre predecido desde la curva, una impredecible falla puede ocurrir.

Cualquier desviación de la curva lisa o uniforme debe ser vista como una advertencia de un posible acercamiento a la tensión antes ruptura del aislamiento.

La desviación debe ser confirmada por mas medidas para uno o más incremento de voltaje. Debe recordarse que las advertencias a veces se obtienen con un pequeño 5% debajo de la tensión antes ruptura. Cuando la desviación es confirmada, la prueba debe ser parada así la posible ruptura será evitada.



**Figura 5.2** Tensión D.C. Vs Corriente de pérdida

#### 5.1.1.1.5 Prueba Sobretensión Tiempo Graduado D.C.

Esta prueba es deseable únicamente para obtener la corriente de fuga verdadera con una prueba de voltaje controlable. Sin embargo, el

procedimiento requiere un compromiso que permita también un informe del tiempo de cada voltaje y manteniéndolo cada voltaje para tiempos muy largos así la absorción es prácticamente nula y queda únicamente el corriente remanente de fuga.

Para que la absorción fuera aproximada, se consumiría mucho tiempo de prueba. el tiempo de método graduado, en un tiempo razonable provee una curva relacionada a la componente de corriente de fuga verdadera. el desarrollo de este método es etapa por etapa.

1. La etapa de la tensión inicial es aproximadamente 30% de la ultima tensión de prueba.

2. Subir el voltaje rápidamente (2 a 3 segundos) para iniciar valor aproximadamente 5 a 10% debajo del valor deseado para permitir por voltaje incremento durante la prueba de absorción y para el final cada etapa para el voltaje de prueba deseado.

3. Registrar en microamperios para 0.5, 0.75, 1.0, 1.5, y 2.0 minutos y cada minuto después de esto a 10.

4. Los valores de microamperios deben ser dibujados sobre un papel gráfico durante esta prueba.

5. Marcar a los 8 minutos, debe ser bastante fácil para proyectar la curva para el valor 10 minuto. tres puntos son leídos desde la curva lisa que deben ser usado en él calculo de la componente de conducción de la corriente medida. estos valores son la corriente total de 1.0, 3.6, y 10 minutos. el 3.16 es una aproximación del punto medio entre 1.0 y 10 minutos sobre la longitud de la escala.

6. Valores son sustituidos en el desarrollo de la formula para la componente de conducción.

$$C = \frac{A}{B} = \frac{(i_{1.0} \times i_{10.0}) - (i_{3.16})^2}{(i_{1.0} + i_{10.0}) - 2 \times i_{3.16}}$$

7. Sustrayendo C de 1 y 10 minutos del total de la corriente leída se obtiene la corriente debido a la absorción para estos tiempos. este nuevo valor puede entonces ser usado para calcular el radio de absorción como sigue:

$$N = \frac{i_{1.0} - C}{i_{10.0} - C} = \frac{i_a 1.0}{i_a 10.0}$$

8. De la tabla 5.1 de IEEE no. 95, seleccionar el horario de tiempo para el valor calculado de N. Si N no es numero entero, seleccionar el valor mas próximo a N.

Al final del periodo de 10 minutos, subir el voltaje de prueba 20% como indica en la tabla 5.1

Este final de periodo de prueba en el tiempo mostrado en la tabla para el calculado radio de absorción. Registrar microamperios justo antes de subir voltaje de la próxima etapa. Cada etapa sucesiva es 20% incrementada en voltaje. Si el voltaje tiende a subir, ajustar el voltaje para corregir el valor correcto durante los primeros 10 segundos de la etapa.

9. De nuevo dibujar la corriente vs. KV. A lo largo de la prueba. La evaluación apropiada de este dato es necesario para determinar si la prueba puede continuar hasta el valor de prueba final sin falla.

TABLA 5.1 TIEMPO A PASAR DESPUES DE LA CONCLUSION DE CADA ETAPA DE VOLTAJE

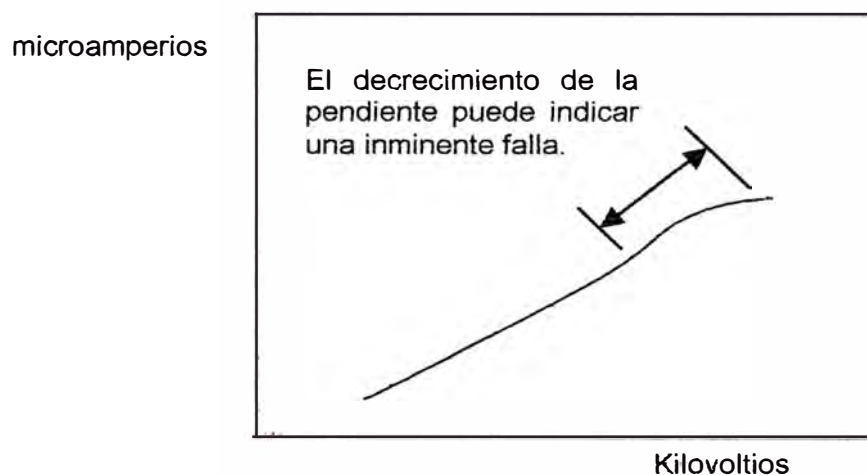
PORCENTAJE VOLTAJE DE 1ra. ETAPA	RADIO DE ABSORCION N															
	2		3		4		5		6		7		8		9	
	(min)	(s)	(min)	(s)	(min)	(s)	(min)	(s)	(min)	(s)	(min)	(s)	(min)	(s)	(min)	(s)
100	10		10		10		10		10		10		10		10	
120	13	14	13	27	13	36	13	44	13	49	13	54	13	58	14	2
140	15	56	16	21	16	39	16	53	17	4	17	14	17	22	17	30
160	18	17	18	55	18	21	19	42	19	59	20	13	20	25	20	36
180	20	24	21	12	21	47	22	14	22	37	22	56	23	12	23	26
200	22	19	23	18	24	1	24	34	25	2	25	25	25	46	26	4
220	24	4	25	14	26	4	26	43	27	17	27	45	28	9	28	31
240	25	42	27	1	27	59	28	45	29	23	29	55	30	34	30	49
260	27	12	28	41	29	47	30	38	31	21	31	58	32	30	32	59
280	28	37	30	15	31	28	32	25	33	13	33	54	34	30	35	2
300	29	57	31	44	33	3	34	7	34	59	35	44	36	24	36	59
320	31	12	33	8	34	34	35	43	36	40	37	29	38	12	38	51
340	32	23	34	27	36	0	37	14	38	16	39	9	39	56	40	38
360	33	31	35	43	37	22	38	41	39	48	40	45	41	35	42	20
380	34	35	36	55	38	40	40	5	41	16	42	17	43	11	43	58
400	35	36	38	4	39	55	41	25	42	40	43	45	44	42	45	33
420	36	35	39	10	41	7	42	42	44	2	45	10	46	11	47	6
440	37	31	40	14	42	17	43	56	45	20	46	32	47	36	48	33
460	38	35	41	15	43	23	45	8	46	35	47	51	48	58	49	58
480	39	17	42	14	44	28	46	17	47	48	49	8	50	18	51	21
500	40	8	43	11	45	30	47	23	48	59	50	22	51	35	52	41
520	40	56	44	6	46	30	48	28	50	8	51	34	2	51	53	59
540	41	42	44	58	47	29	49	31	51	14	52	44	54	3	55	15
560	42	28	45	50	48	25	50	31	52	19	53	52	55	14	56	28
580	43	11	46	40	49	20	51	30	53	21	54	58	56	23	57	40
600	43	54	47	28	50	13	52	28	54	22	56	2	57	30	58	50
620	44	35	48	15	51	4	53	24	55	22	57	5	58	36	59	58
640	45	15	49	1	51	54	54	18	56	19	58	6	59	40	61	4
660	45	53	49	45	52	44	55	11	57	16	59	8	60	42	62	9
680	46	31	50	28	53	32	56	3	58	11	60	3	61	43	63	13
700	47	8	51	10	54	18	56	53	59	5	61	0	62	43	64	15
720	47	43	51	51	55	4	57	42	59	58	61	56	63	41	65	16
740	48	18	52	32	55	48	58	30	60	49	62	50	64	38	66	16
760	48	52	53	11	56	32	59	18	61	39	63	43	65	34	67	13
780	49	25	53	49	57	14	60	3	62	28	64	35	66	25	68	10
800	49	58	54	26	57	55	60	48	63	17	65	26	67	22	69	6
820	50	29	55	3	58	36	61	33	64	4	66	16	68	14	70	1
840	51	0	55	38	59	16	62	16	64	50	67	6	69	5	70	55
860	51	30	56	13	59	55	62	58	65	35	67	54	69	57	71	48
880	52	0	56	40	60	33	63	40	66	20	68	41	70	47	72	40
900	52	29	57	21	61	10	64	20	67	6	69	27	71	35	73	31
920	52	57	57	54	61	46	65	0	67	46	70	13	72	23	74	22
940	53	25	58	26	62	23	65	39	68	29	70	58	73	10	75	11
960	53	53	58	58	62	58	66	18	69	10	71	41	73	57	75	59
980	54	20	59	28	63	32	66	56	69	50	72	24	74	42	76	46

10. Asumiendo que el resultado de la prueba es positivo, La prueba debe continuar hasta el voltaje final es alcanzado después que el voltaje es gradualmente reducido para cero. El bobinado poner a tierra después de la prueba como se indica antes.

#### Evaluación del Resultado de Prueba

La evaluación apropiada de los datos tomados por la prueba de tiempo graduado es un método fiable de evaluar las condiciones de la maquina. Los más comunes métodos son dibujados kV vs microamperios a lo largo de la prueba.

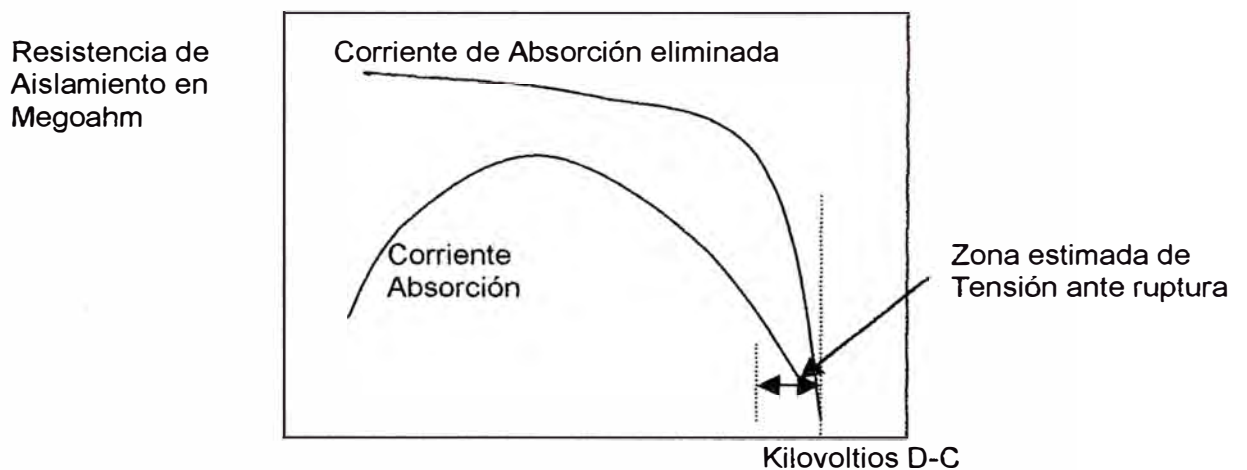
La figura 5.2 es una típica curva de prueba donde la corriente de fuga incrementa gradualmente sobre los 30 kV. El sistema entonces muestra un incremento marcado en la pendiente que puede predecir una posible falla. La conducta de la corriente debe ser observada continuamente para permitir por las variaciones debido a las oscilaciones del voltaje de línea. Interpolando estas variaciones, el resultado mas aproximado se puede obtener. A veces un decrecimiento marcado en la pendiente indica una inminente falla como en la figura 5.3.



**Figura 5.3** Tensión D.C. Vs Corriente de perdida

Uno de los buenos acercamientos del dibujo de los datos (microamperios vs. kVDC) es monitorear la resistencia de aislamiento. El gráfico se realizara en especial papel megaohm para dibujar microamperios versus tensión, La resistencia de aislamiento es automáticamente calculada. (ver figura 5.4)

Normalmente, en esta prueba de este tipo sobre una maquina de tres fases, cada fase es probada individualmente con otras dos fases a tierra. Es necesario cada fase a tierra después de una simple prueba para sobre 1 hora después arrancar la prueba de la otra fase. Esto puede minimizar algunos efectos de polarización y minimizar la variación de datos de prueba entre fases. Cuando comparamos datos tomamos para dos diferentes tiempos, esto es importante para comparar temperatura de bobinados, como el aislamiento es muy sensible de la temperatura.



**Figura 5.4** Tensión D.C. Vs Resistencia de aislamiento

#### 5.1.1.1.6 La Prueba D.C. Rampa

Se ha informado que la técnica de prueba de voltaje rampa automáticamente linearía la componente de absorción dieléctrica de corriente



de aislamiento eliminando cualquiera de los problemas encontrados en el método prueba voltaje escalonado d-c.

Compensación automática de corriente de absorción es realizado para eliminar los necesarios cálculos de corriente absorción extensiva y complejos horarios de tiempo para las pruebas. Esta técnica tiene su primer publicación en un documento en la Hidro Ontario en 1964. Sin embargo, entonces este tipo de instrumento de prueba ha sido perfeccionado por el uso de un control d-c programable esa genera automáticamente una rampa de alto voltaje a un rango preseleccionado (usualmente 1kV/min.).

La corriente aislamiento vs. el voltaje aplicado es dibujado sobre un X-Y registrado proveyendo continuamente observación y análisis de la corriente de aislamiento responsable cuando la prueba progresa. Esta prueba es construida con un regulador de voltaje extremadamente estable. Por esta razón fluctuaciones cortas de voltaje en la fuente de potencia puede producir relativas largas fluctuaciones de corriente debido a la alta capacitancia de la prueba específica.

El rango de 1kV/min., es normalmente usado para probar el aislamiento del bobinado del estator.

Este valor produce una respuesta de corriente similar a la prueba escalonada y es un poco de un compromiso entre máxima sensibilidad y mínima duración de prueba. El máximo voltaje límite es lo mismo como en la prueba escalonada con la excepción de la prueba de aceptación.

La prueba deben terminarse siempre que la corriente de fuga arranque y se vuelva excesiva. Desarrollando algunas pautas que ayudan a determinar

cuando la prueba de aislamiento debe ser terminada por causa de alta corriente de fuga.

1. La prueba de etapas debe ser detenida siempre que la resistencia de aislamiento cae debajo del 33% del valor de la resistencia inicial.

2. La prueba rampa debe ser terminada cuando a 1 o 2 un o largo de repente se observa que se incrementa la corriente de aislamiento. Si la corriente es inestable o allí esta más tipo escalonada de incremento directo siguiendo el primer incremento de repente, la prueba debe ser detenida.

3. Un aislamiento tiene un incremento gradual de corriente de fuga puede tolerar mucha alta corriente de fuga que un aislamiento tiene un abrupta incremento de corriente en la curva V.I. Una prueba sobre un aislamiento tiene un despacio incremento de corriente de fuga, debe ser parado cuando la corriente de aislamiento total se vuelve tres a seis veces más grande que la componente capacitiva de corriente.

Después de la prueba, la rampa switch debe ser restablecida y el voltaje de bobinado alcanza para sangre abajo por el aproximadamente 15 kV. El pico de descarga (100M 15 kV.) puede entonces ser usado para descargar el bobinado abajo 3 a 5kV antes del cortar con la tierra arco. El bobinado debe ser puesto a tierra para cuatro veces la carga tiempo antes d-c prueba o a-c prueba sea aplicada.

### **5.1.2 Pruebas A.C.**

Una de las más fundamental y obvia prueba necesaria para equipos de generación de potencia es la prueba de alta tensión. Estas pruebas son realizadas para revelar defectos en las pruebas de aislamiento antes de

poner el equipo en servicio. Hoy en día existen disponibles tres métodos básicos para la prueba de alta tensión.

Convencional A-C

Muy baja frecuencia

Resonante A-C

#### **5.1.2.1 Valor de Prueba y Prueba de Transformador de Potencia**

Algunos dirían que cada prueba se lleva parte de la vida del aislamiento. Sin embargo, se puede demostrar en un laboratorio de prueba que la tensión de prueba de fábrica de 130% de  $2E + 1000$  pueda ser sostenido para un mes antes de causar la falla. La IEEE estándar prueba ( $2E + 1000$ ) podría sostenerse durante 100 meses antes de suceder la falla.

Pruebas del bobinado completo también prueban el circuito de anillo y otros aislamientos que no siempre se curan totalmente para el tiempo de prueba. Para prevenir el esfuerzo en exceso en el aislamiento y para que tenga previa calificación, cada prueba debe ser menos que la prueba previa para prevenir un innecesario daño en el bobinado.

Cuando se prueba una máquina antigua, el nivel de sobretensión puede depender de la magnitud grande del tipo y edad de la máquina involucrada, el grado de exposición.

Para los sobrevoltajes el nivel del servicio habilidad requerida de la máquina en servicio. Debe, sin embargo, investigar lo suficiente para discernir cualquier debilidad o incipiente debilidad en la estructura de aislamiento podría primero llevar a reparar la falla. Debe ser reconocido que si el bobinado están limpiado y secado, La prueba de sobrevoltaje puede no ser

detectada los defectos que están en el final de vueltas o en primacías remoto desde el núcleo del estator, El valor de la prueba de voltaje usualmente son seleccionadas en el rango de 125 a 150% del ratio de voltaje línea a línea y están normalmente sostenidos para un minuto. Por ejemplo para un bobinado de 13.8 kV debe ser probado aproximadamente de 17 a 21 kV. Para evitar daños transitorios, la prueba de voltaje debe ser incrementada despacio hasta el valor final hi-pot. A 1000 voltios por segundo para propósitos más prácticos. Es importante notar que el hecho de sobrecargar la prueba podría crear efectos adversos severos. Cuando el relé de sobrecarga dispara, esto puede introducir un transitorio mal en el circuito de prueba y puede dañar la prueba específica o bobinado. Algunas veces la sobrecarga de prueba puede ser distorsionada la prueba corriente forma de onda, así dando un resultado inadecuado. El siguiente son formulas aproximadas una guía de seguridad para capacitancia de bobinados y kVA requeridos.

Capacitancia del bobinado puede ser calculado por

$$C = \frac{0.2249 \times 10^{-12} KMLQ}{d} \quad (\text{faradios}) \quad \text{ec... (5.1)}$$

Donde:

M = Perímetro de una bobina aislada

L = Longitud total del núcleo (pulgadas)

d = Simple pared aislamiento espesor (pulgadas)

Q = Numero de ranuras

K = 4 para Neccobond bobinado o equivalente.

La simple fase capacitancia con la otra fase a tierra es 40% de la capacitancia de tres fases. Esto es debido el efecto del final de vueltas.

La simple fase kVA requerida puede ser entonces calculada por:

$$KVA = 2\pi f F_c \times C \times E^2 \times 10^{-9} \quad \text{ec ..... (5.2)}$$

Donde:

E = Tensión de prueba de Alta Tensión. Ver tabla 5.3 (voltios)

f = Frecuencia de voltaje aplicado ( Hz)

C = Capacitancia del bobinado (microfaradios)

F<sub>c</sub> = Factor de carga (ver tabla 5.2)

---

Prueba Voltaje para							
Voltaje línea – línea	1.0	1.3	1.5	1.7	1.9	2.1	2.3

---

F <sub>c</sub> (clase B )	1.0	1.03	1.04	1.06	1.08	1.09	1.12
---------------------------	-----	------	------	------	------	------	------

---

**Tabla 5.2** Resultado experimental para National Electric Coil sobre alto tensión bobinado

	Tensión de Prueba 60 Hz, RMS
NEC Factoría	1.3 ( 2E +1000)
Prueba Durante Instalación	1.1( 2E + 1000)
Prueba de Aceptación IEEE Estándar	2E + 1000

**Tabla 5.3** Tensión de Prueba recomendada para bobinados grandes de alta Tensión.

### 5.1.2.2 Pruebas Disponibles Comercialmente

#### 5.1.2.2.1 La Línea de Frecuencia Estándar Prueba de Transformador

Las pruebas con rango de salidas de 0.5 a 500 KVA pueden encontrarse comercialmente. Estos no son muy populares para pruebas de campo debido al peso, tamaño, costos y requerimientos de potencia. Algunos transformadores de prueba tienen un entrehierro incorporado dentro del diseño del núcleo de hierro del transformador de prueba. La corriente magnetizante así requerida puede balancear la salida mayoría de la corriente capacitiva dibujada por el bobinado. Así bajando en KVA requerido de la fuente de potencia.

#### 5.1.2.2.2 Prueba de muy Baja Frecuencia

Para realizar una prueba de baja frecuencia, pueden hacerse juegos de prueba mas encendidas y transportables. Este método es un compromiso entre el económico de prueba d-c y la fiabilidad de toda la frecuencia de

prueba a-c. Por ejemplo, una reducción de 600 a 1 en kVA requerimientos pueden ser logrados por operando de 0.1 Hz en cambio de la convencional 60 Hz. En orden para compensar para compensar por la baja descarga, un voltaje ligeramente mas alto es usado comparado con la prueba de 60 hz. Asea recomienda 1.2 – 1.3 multiplicado para 50 Hz mientras GE usa 1.5 múltiplo para 60 Hz. El alto voltaje en la prueba de VLF ha sido criticado como indeseable porque esto es realmente posible a inducir fallas modo que estas no presentan con el voltaje de operación.

#### **5.1.2.2.3 Prueba de Resonancia**

Resonancia, en el sentido eléctrico, puede ser definido como la condición para el cual la malla inductiva cancela a la malla de reactancia capacitiva. La figura comúnmente usada de mérito en un sistema de resonancia es el factor calidad, o "Q". Para sistema sinusoidal, que son de interés aquí, Q es definida como el ratio de energía guardada y energía disipada por medio ciclo. Con máximo de corriente a través del inductor (energía cinética) mínimo voltaje aparezca por el capacitor (energía potencial), y viceversa. La fuente de potencia es un sistema de prueba, opera en modo de resonancia, es usado para alimentar la energía de disipación. En un sistema de diseño apropiado, estas perdidas son únicas y de fracción pequeña de la energía guardada. La energía guardada en el circuito de prueba es transferida desde el inductor para el capacitor, y viceversa cada medio ciclo.

El factor Q es aproximadamente equivalente para la relación de salida kva y entrada kw . Dada el kVA requerido de la carga Q de operación del

sistema de prueba, la entrada de potencia puede ser obtenida dividiendo kVA por el Q.

Con la técnica de resonancia, el sistema puede estar a punto para resonancia con única una fracción del voltaje de prueba aplicado. Después resonancia es lograda, el voltaje puede ser subido al nivel deseado. Sin embargo, una vez el ajuste de la prueba de resonancia es puesto a punto para la capacitancia de la carga, el procedimiento de prueba es exactamente de la misma manera como con un sistema convencional a-c sistema.

La técnica de serie resonante es generalmente usada para prueba hi pot de bobinado de generador.

Usando la técnica de serie resonante, el voltaje desarrollado por el capacitor (el bobinado) es proporcional a Q. En el evento de falla de aislamiento, el resultado de pérdida decrece la Q, el voltaje por el capacitor colapsa instantáneamente, y la corriente de falla es limitada por la inductancia en serie con el baja excitación de voltaje. El daño para la prueba específica es así prevenida.

La técnica de resonancia serie involucra el uso de un reactor variable HV y o fuente de excitación. El corazón del sistema es un reactor núcleo de hierro con un entrehierro variable encerrado en una bobina. Este arreglo constructivo del flujo magnético para el área adjunta del entrehierro, el flujo encontrado y en giro la unidad. El reactor variable es lineal sobre el rango completo del voltaje variable.

Otra ventaja del sistema de resonancia se vuelve eminente durante la medida de corona, que requiere las más puras ondas sinusoidales. Obviamente esto es más fácil para filtrar un sistema resonante requerido 25



kVA entrada de potencia que el equivalente 1000 o 2000 kVA sistema convencional.

Como el sistema resonante por su muy natural discriminación contra armónicos.

### **5.1.3 Pruebas de Capacitancia y Factor de Disipación.**

El factor de potencia del aislamiento es una medida no destructiva, que es usada en chequear bobinas en procesos de fabricación y pueden diagnosticar las condiciones del aislamiento en operación en operación con otras pruebas. La interpretación de resultados en términos de anticipación de performance del aislamiento, Sin embargo, normalmente no es una cuestión simple.

Un incremento en el factor de potencia o factor de potencia tip up sobre el valor "normal" para un aislamiento dado indica que un cambio ha ocurrido y es causa de preocupación.

#### **5.1.3.1 Definición de Factor de Potencia y Tang $\delta$**

Un aislamiento perfecto puede ser considerado como un capacitor perfecto  $C$ , y la relación entre una tensión ac aplicada  $V$  y la corriente  $I$  es  $I=j\omega CV$ .

La corriente adelanta al voltaje por  $90^\circ$  como se observa el la figura 5.5.

En la practica, Sin embargo, el aislamiento no es perfecto, como esta relación voltaje corriente puede incluir un termino de conducción  $G$  causado una Fuga:  $I=(G+j\omega C)V$ .

Tal aislamiento puede ser representado por un capacitor y una resistencia en paralelo, y este ángulo de fase entre el voltaje y la corriente

puede ser menor que  $90^\circ$ , como se ve en la parte inferior de la fig. 5.5.  $\text{Tang } \delta$  es el radio entre la corriente resistiva y capacitiva, o  $\text{Tang } \delta = G/\omega C$ , y la pérdida dieléctrica,  $P$  es por consiguiente relacionado

con  $\text{Tang } \delta$ , como  $P = KGV^2 = V^2\omega CK \text{ tang } \delta$ .

$\text{Tang } \delta$  es conocido como un factor de disipación de un aislamiento.

Matemáticamente el factor de potencia es definido como el Coseno  $\theta$ , El radio de la corriente resistiva  $GV$  y la Corriente total  $I$ .

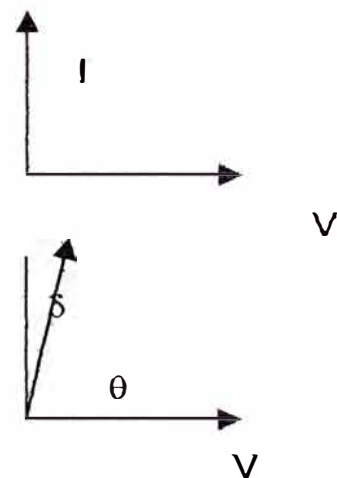
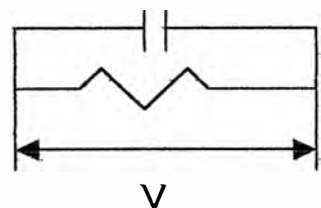
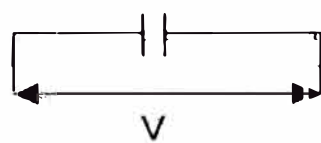
$$\text{P.F.} = \cos \theta = GV/I = GV/(G+j\omega C)V$$

Para pequeñas pérdidas el ángulo  $\delta$ ,  $GV$  es muy pequeña que  $j\omega CV$  y así  $\text{P.F.} = \text{Tan } \delta$ .

Esto es verdad para valores de  $\text{Tan } \delta$  de 0 a 0.1 (0-10%), El rango usualmente encontrado en medidas sobre aislamiento de bobinas.

Esta aproximación es usada desde  $\text{Tan } \delta$  es simple para medir el factor de potencia.

Aislamiento Perfecto



**Figura 5.5** Circuito elemental del aislamiento

### 5.1.3.2 Factores que Influencian las Dimensiones de $\text{Tan } \delta$

Características del aislamiento que afectan los valores de  $\text{Tan } \delta$ , son vacíos internos, humedad, Polaridad y contenido iónico, grado de curado de la resina o degradación.

Desgraciadamente, los valores de la medida son también apreciablemente afectados por variables experimentales incluyendo voltaje, frecuencia, temperatura, Atmósfera (Presión de vacío, aire, gas inerte, entre otros.), Tipo y tamaño del electrodo, tipo de equipo de prueba usado. El largo número de variables involucradas hacen muy dificultosa la reproducción de valor  $\text{tan } \delta$  para diferentes laboratorios. El uso de  $\text{tan } \delta$  es por consiguiente usado con fines de comparación de materiales probados usando el mismo equipo bajo idénticas condiciones experimentales.

### 5.1.3.3 Uso de $\text{Tan } \delta$

El factor de disipación es una medida de característica de pérdida del aislamiento. En la mayoría de materiales el valor es bajo, y no se incrementa apreciablemente con la temperatura. Con algunas resinas sin embargo el factor de disipación incrementa grandemente en calentar.

El aislamiento actual se vuelve conductor llevando a la falla prematura.

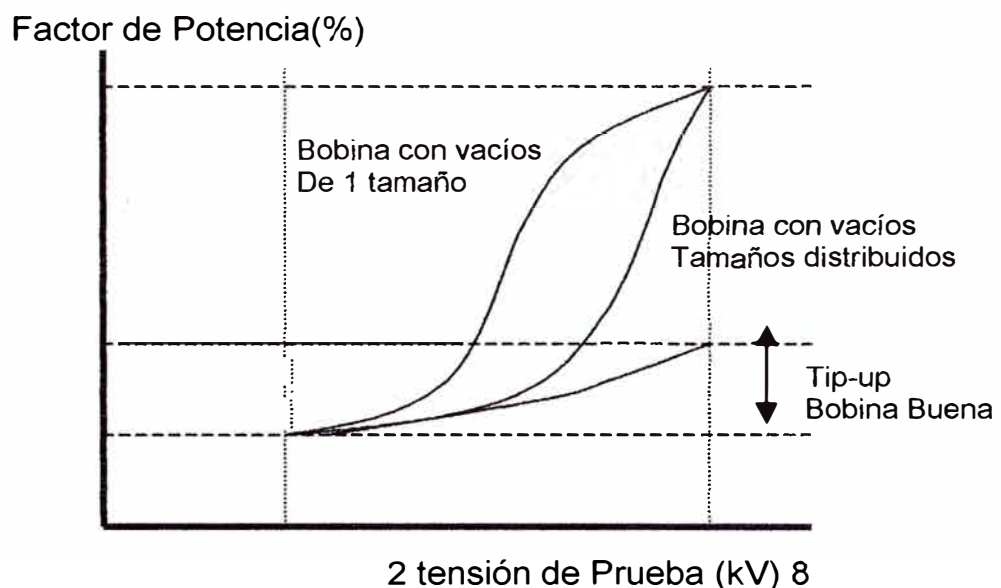
Esto es posible para seguir él sin secar de equipo, usando  $\text{tan } \delta$ , pero esto normalmente no se hace desde que es más simple medir la resistencia de aislamiento.

El grado de curado de la resina puede ser estudiado usando cambios en el factor de disipación, pero esto es un procedimiento de laboratorio.

#### 5.1.3.4 Factor de Potencia Tip-Up

La diferencia en las medidas de del factor de potencia para dos voltajes es una medida de incremento de perdida. Subsecuente el factor de potencia de la resina usado en el aislamiento de alto voltaje no es muy sensible al voltaje, las perdidas son debido a la ionización de los vacíos internos, con las condiciones externas controladas. Esta medición de factor de potencia Tip-Up es realizada en alto voltaje (sobre los 6.6kV.) bobinas del estator ha demostrado ser valioso en comparación de sistemas de aislamiento y procesos. Para el control de calidad de un sistema dado y para una prueba en servicio. Esta prueba es descrita en IEEE Estándar No 286. La típica curva factor de potencia – voltaje es mostrado en la figura 5.6

La magnitud del valor tip-up es tomado como una medida del volumen de vacío del aislamiento. Por definición Tip-Up es la diferencia entre el factor de potencia del aislamiento para dos voltajes designados. Para una maquina de 13.8 kV voltaje de 8 kV (60 vpm) y 2 kV (15 vpm) ha sido a menudo especificado.



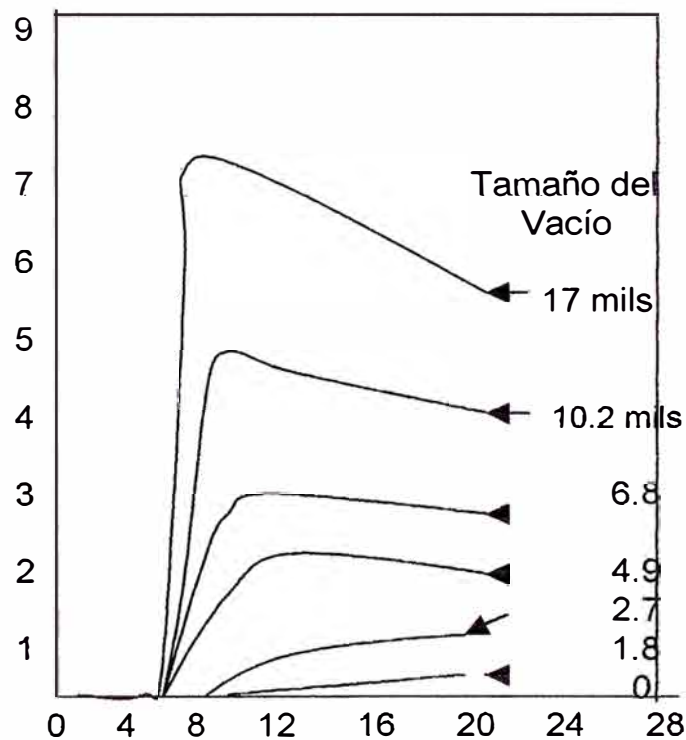
**Figura 5.6** Características del Factor de Potencia vs. Tensión de una Bobina de alta tensión.

#### 5.1.3.4.1 Factores que Influyen en la Medida del Tip-Up

El principal factor determinante del valor de tip-up es usualmente la ionización de gases incluido (vacíos) en la estructura del aislamiento. Como la tensión crítica sobre cada vacío es excedida ocurre la ionización, referido como corona interna.

El efecto del tamaño del vacío sobre el factor de potencia – voltaje para una hoja de polystyrene es mostrada en la figura 5.7 Un voltaje de 12 kV (110 V/mil) es necesario para detectar a 1.8 mil vacío. Por esta causa de la alta constante dieléctrica de la mica contenida en el sistema de aislamiento un vacío de aproximadamente 1 mil puede ser detectada con este voltaje. En cualquier evento, el resultado indica que el vacío regular puede no ser detectado usando prueba tip-up de 8 kV – 2 kV.

Tang  $\delta$



**Figura 5.7** Efecto del tamaño del vacío en la curva característica

Tensión – Factor de potencia para una hoja de 107 mils  
De Poliéstirimida.

#### 5.1.3.4.2 Otros Factores que Influyen en el Valor Tip-Up son:

- a. Ionización polar y resistencia perdida en la estructura del aislamiento.
- b. Perdida en la forro conductora o semiconductor sobre la superficie del aislamiento de quien cambia la resistividad con la densidad de corriente. Condiciones de superficie son particularmente un problema para pruebas bobinas que están en servicio.

Para los verdaderos valores de factor de potencia y tip-up, deben usarse los electrodos de guardia. Las medidas realizadas sin guardia pueden contener un error debido al voltaje sensitiva material en la ruta de fuga.

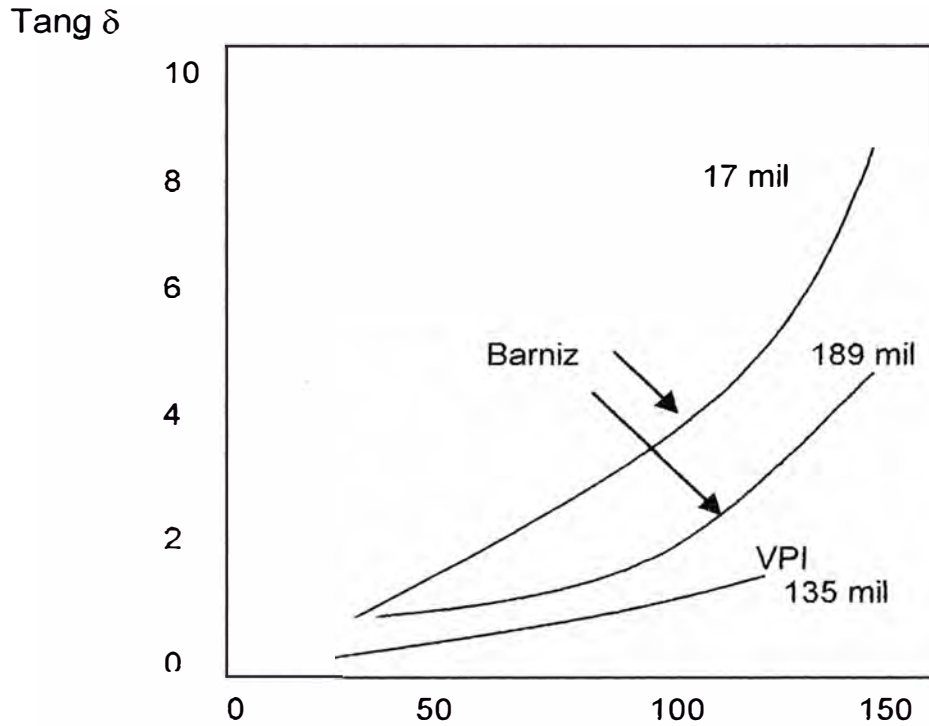
#### 5.1.3.4.3 Usos del Factor de Potencia Tip-Up

- a. Comparación de Barniz vs aislamiento impregnado para bobinas 13.8 kV. Figura 5.8 muestra una comparación de  $\tan \delta$  vs voltaje (expresado en V/mil, r.m.s) para pruebas de aislamiento de barras con un aislamiento barniz (GE 77866 tape) y National Neccobond. Si el 60-15 o 100 – 10 V/mil prueba tip-up, El sistema VPI tiene bajo tip-up significa menos vacíos.

- b. Control de calidad para un sistema de aislamiento dado, los valores  $\tan \delta$  y tip –up obtenidos en cada bobina pueden asegurar que la bobina se ha curado apropiadamente y buena presión para quitar los vacíos. Las bobinas con valores  $\tan \delta$  , tip – up sobre los limites especificados es rechaza. ( ver Tabla 5.4)

- c. Prueba en servicio- Un incremento en el factor de potencia tip-up del aislamiento de una bobina durante la vida de servicio puede ser el resultado del proceso de deterioro que incrementa formación de vacío dentro de la estructura del aislamiento. El ciclo de carga puede crear vacíos en el

aislamiento debido a la separación física de estos componentes. Alta temperatura y ionización bajo condiciones de servicio pueden crear vacíos debido a la desintegración dentro de la estructura.



**Figura 5.8** Características Voltaje – Factor de potencia para aislamiento De Barniz y VPI en bobinas de alta tensión.

	Tip – Up	Tip – Up
Sistema	60 vpm – 15 vpm	100 vpm - 10 vpm
Barniz 117 mil	1.4 ( 7 - 1.8kV )	5 ( 12 - 1.2 kV )
Barniz 189 mil	0.8 ( 11 - 2.8 kV)	2.7 ( 19 - 1.9 kV)
VPI	0.4 ( 8 - 2 kV)	1.0 ( 14 - 1.4 kV)

**Tabla 5.4** Valores de Tip-Up

Las medidas en servicio del tip-up sin abrir las conexiones de bobina, es un pequeño valor por cualquier área de alta pérdida es enmascarado en medida el grande aislamiento volumen de una fase completa o incluso en paralelo. Para usar otro método para localizar descargas parciales, las bobinas cuestionadas pueden ser identificadas y aisladas para medir tip-up

#### 5.1.3.4.4 Equipos de Prueba

Los requerimientos detallados para un equipo de prueba conveniente están dados en IEEE Estándar No 286. El puente para medir tan  $\delta$  usado por la National Electric Coil son listados abajo con sus rangos de de sensibilidad.

Puente	Tensión	Tang $\delta$ , %
Schering (Beckman)	0 - 15 kV	0.01
Doble	0 - 20 kV	0.01
Tettex	0 - 50 kV	0.001
Transformer (MWB)	0 - 30 kV	0.0001

El puente tettex bos da la capacidad de medir tang  $\delta$  para voltajes aprovechando la tensión antes ruptura de bobinas de alta tensión.



### **5.1.3.5 Procedimiento de Prueba.**

a. Producción.- Cuando se aplica la pintura de tierra en la ranura en bobinas de alta tensión, huecos sin pintar queda para formar electrodos de guardia, Cada bobina es probada para encontrar el standar NEC mostrado en la tabla 5.5 Usando un puente a-c. Las mediciones están realizadas para niveles de tensión calculados por cada bobina diseñada.

b. Instalación de bobinas.- Bajo condiciones ordinarias, el acceso para el conductor de bobina es disponible únicamente en los terminales de la maquina. La medición del Factor de Potencia de una fase entera es de pequeña importancia desde que cualquier área defectuosa es mostrada por el balance de la bobina.

Donde un bobinado es para ser reemplazado, las conexiones de las bobinas pueden ser abiertas y realizar un estudio de bobinas individuales.

Varios métodos de detección de descargas parciales están siendo usados. Estas bobinas pueden ser desconectadas y probar el factor de potencia para verificar la descarga prueba encontrada.

Especificación	Tensión de Prueba Inicial		Tip – Up ( por 0.2 VL)		Máximo cambio por 0.2 VL
	Tensión	Nivel Aceptado	Rango	Nivel Aceptado	
IEEE # 286	0.25 VN (2 kV)	-----	1.0 VN -0.25 VN	-----	-----
BEAMA # REM 500 y VDE # 530 95%	0.2 VL (2.8 kV)	4%	0.6VL-0.2VL (8.3kV-2.8kV)	0.6%  0.25%	0.6%  0.5%
National Electric Coil	15 VPM (2.0 kV)	3%	60 VPM-15VPM (8kV-2.8kV)	1.0%	-----

VN = Tensión Línea a Neutro

VL = Tensión Línea a Línea

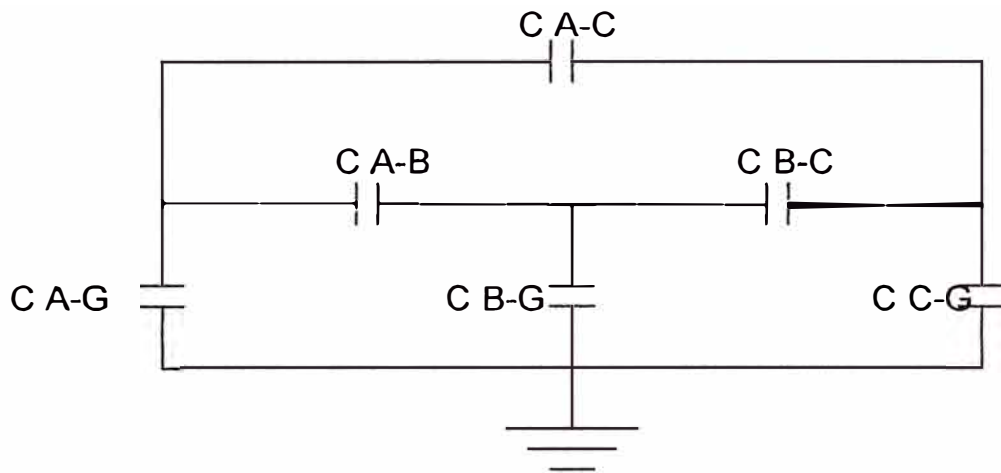
KV Valor basado sobre VL = 13.8 kV

**Tabla 5.5** Factor de potencia Tip – Up Estandarizados

#### 5.1.4 Medición de las Capacitancias y el Factor de Disipación.

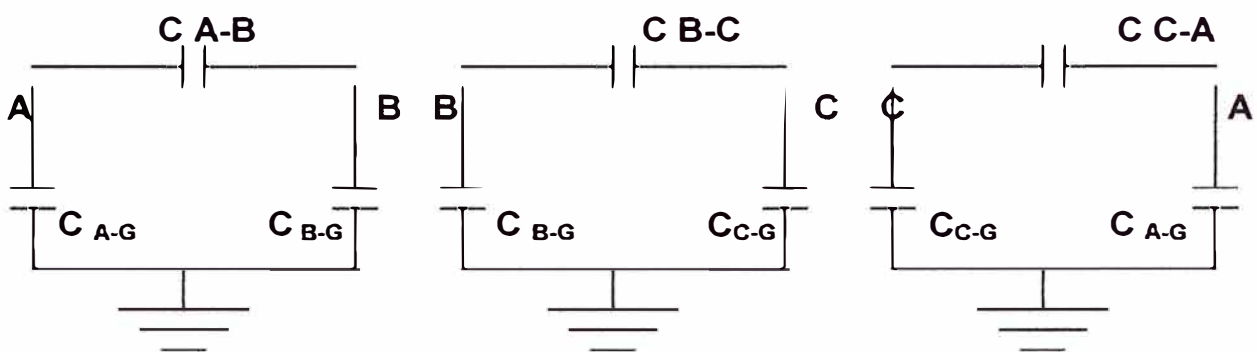
Para la detección y localización de las áreas defectuosas del aislamiento, se ha procedido a esquematizar y hacer un modelo del equipo, mediante el cual representamos el aislamiento del generador para cada prueba como un sistema de capacitancias tal como se muestra en la figura

5.9



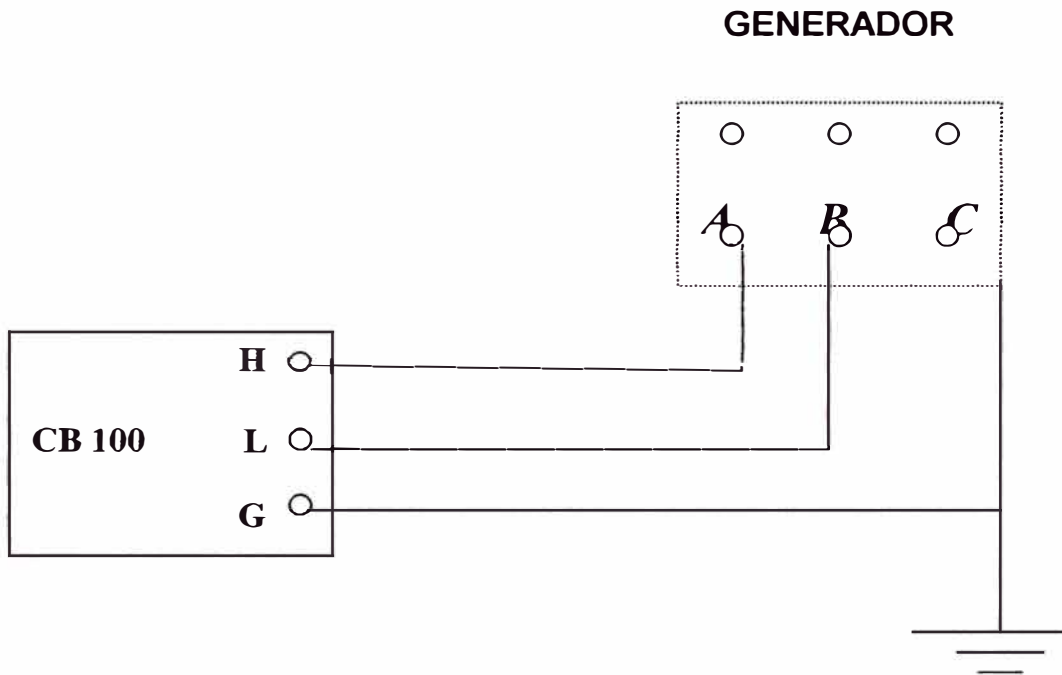
**Figura 5.9** Esquema capacitivo representativo del aislamiento del generador sincrónico.

Para determinar las capacitancias en el generador se deberá efectuar 3 mediciones con diferentes conexiones como en la figura 5.11 cuyos esquemas capacitivos representativo del aislamiento será como la figura 5.10

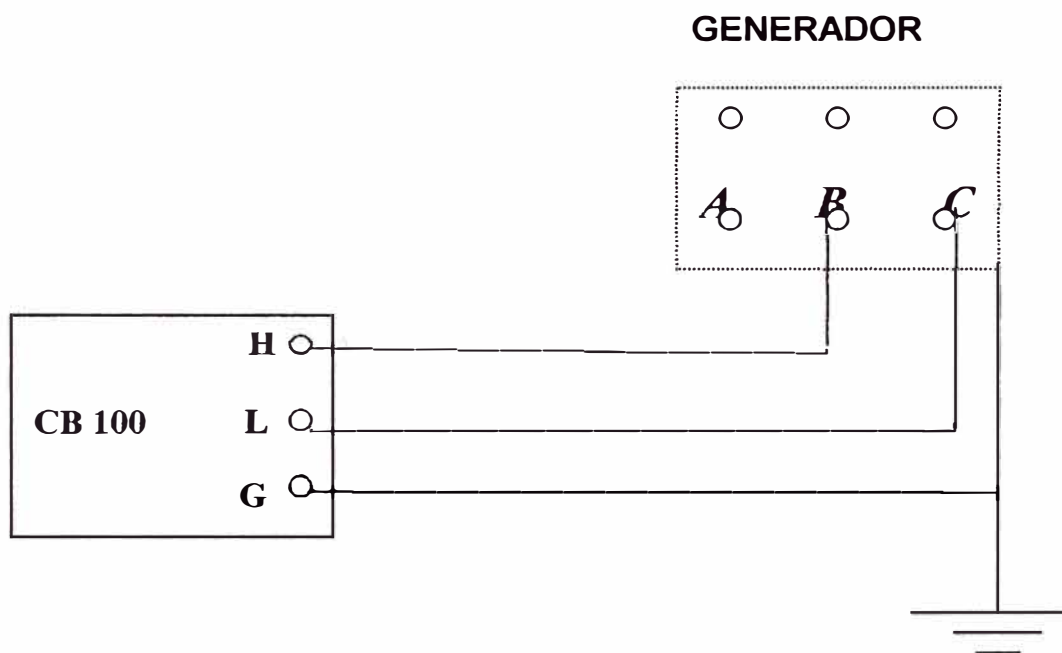


**Fig. 5.10** Esquema representativo de las conexiones para las pruebas

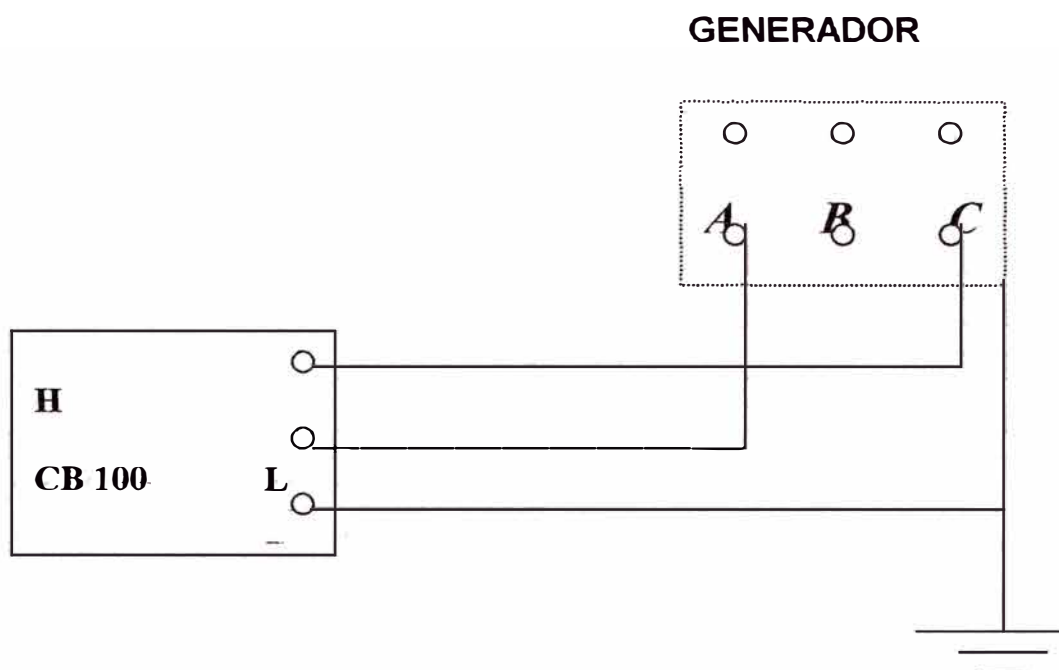
Estas mediciones serán efectuadas con el puente de capacitancias CB-100 Multi Amp., bajo el esquema de la figura 5.11 entre los bornes A-B, B-C, C-A. La tabla 5.6 será utilizado para toma de lecturas.



**Figura 5.11a** Configuración I para la medición CAB



**Figura 5.11b** Configuración II para la medición CBC



**Figura 5.11c** Configuración III para la medición CAC

Donde:

CAB : Capacitancia entre las fases A y B

CBC : Capacitancia entre las fases B y C

CCA : Capacitancia entre las fases C y A

CAN : Capacitancia entre las fases A y N

CBN : Capacitancia entre las fases B y N

CCN : Capacitancia entre las fases C y N

## PUENTE DE MEDICION CB 100, DE CAPACITANCIAS Y FACTOR DE DISIPACION DE AISLAMIENTO

### GENERADOR SINCRONO

I. INFORMACION GENERAL	II. CARACTERISTICAS DE PLACA	III. CONDICIONES AMBIENTALES
<b>Fecha:</b> <b>Ubicación:</b> <b>Equipo:</b>	<b>Fabricante:</b> <b>N°:</b> <b>Año:</b> <b>Potencia:</b> <b>Tension:</b> <b>F.P.:</b> <b>Hz:</b>	<b>Temp. Amb.:</b> <b>Humedad Relativa %:</b> <b>Observaciones.:</b>

#### IV. MEDICIONES : Configuración I (Ver cuadro VII)

CONEXIONES DE PRUEBA	LECTURA DE CAPACITANCIAS	FACTOR DE DISIPACION
Prueba Switch de Posición	Mult.                      Cap.                      Total	Rango                      Lectura                      Total                      Corrección a
	sw.                      sw+dial                      (µF.)	( % )                      (Dial)                      (%)                      20°C (%)
1 Cap H - L		
2 Cap H - G, ( L - GUARD )		
3 Cap L - G, ( H - GUARD )		
4 Cap [ H - L + H - G ], ( L - GND )		
5 Cap [ L - H + L - G ], ( H - GND )		

**Tabla 5.6 Medición de las Capacitancias y el factor de disipación**

---



---

## **5.2 Pruebas de Características del Generador Sincrono**

### **5.2.1 Prueba de Vacío**

#### **5.2.1.1 Procedimiento**

Para obtener la curva de saturación en vacío, se realizara esta prueba haciendo funcionar esta maquina como generador mediante su turbina a la velocidad nominal con los bornes del estator en vacío y alimentando la excitación desde otro grupo disponible. El esquema de conexión es de la figura 5.12

Se varia la excitación para producir tensiones en bornes del estator del 20 al 130% de la tensión nominal en forma ascendente y luego en forma descendente. Los resultados serán registrados en la tabla 5.7, los mismos que se plotearan a medida que se desarrolla la prueba para observar el codo de saturación de la curva y evitar llegar a saturar el núcleo.

#### **5.2.1.2 Equipos e Instrumentos Necesarios**

Af = Pinza amperimetrica DC 0-1000<sup>a</sup>

V1, V2, V3 = Voltímetro patrón 0-150 VAC.

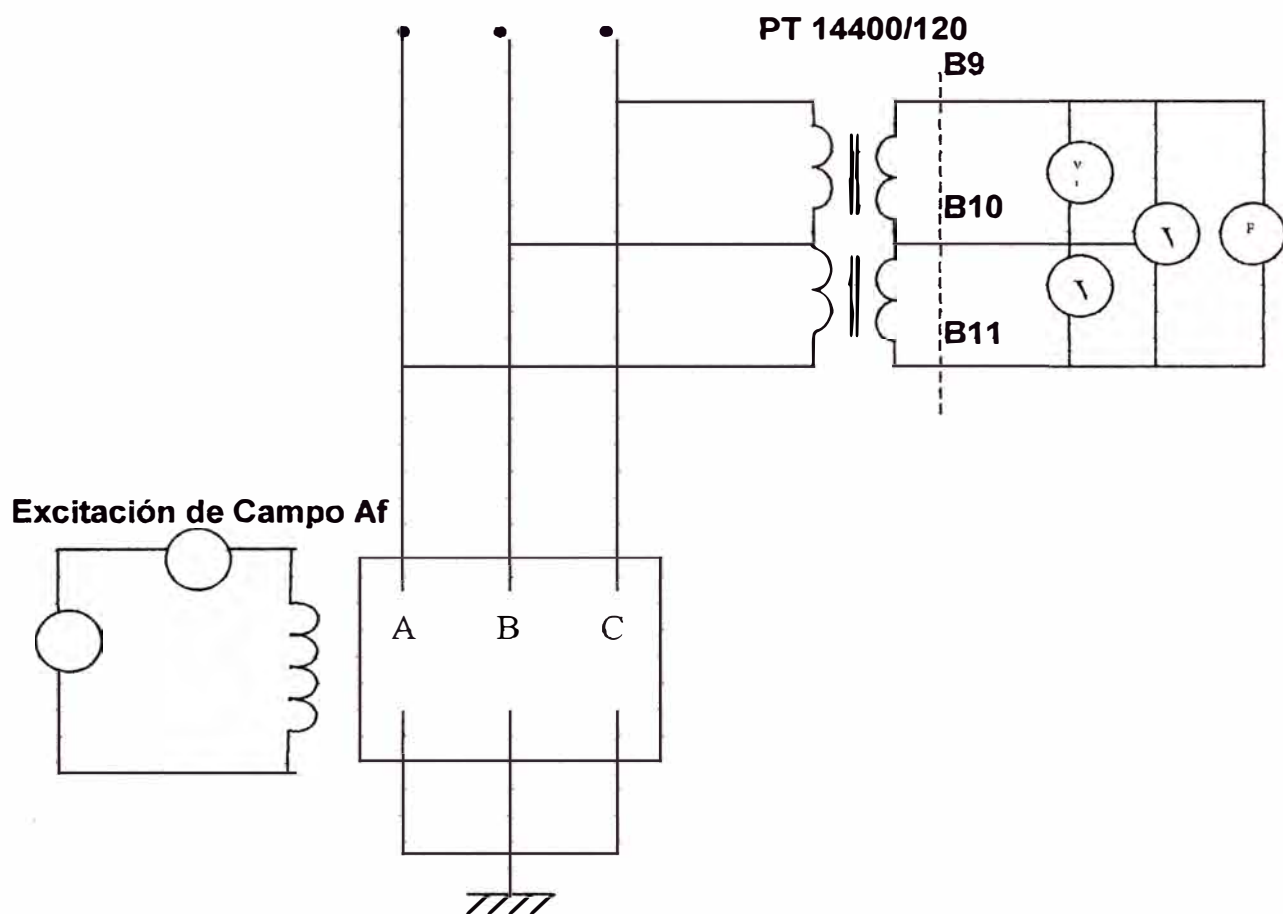
F = Frecuencímetro 56 – 64 Hz., 120 V.

### **5.2.2 Prueba de Cortocircuito**

#### **5.2.2.1 Procedimiento**

Para obtener la curva de saturación en cortocircuito, se realizara esta prueba haciendo funcionar la maquina como generador mediante su turbina a la velocidad nominal con los bornes del estator en cortocircuito y alimentando la excitación desde otro grupo disponible. El esquema de conexión es de la figura 5.13

Sé varia la excitación para producir corrientes de línea desde el 20 al 120% de la corriente nominal. Los resultados se registran en la tabla 5.8



**Figura 5.12** Circuito Eléctrico para la prueba de vacío



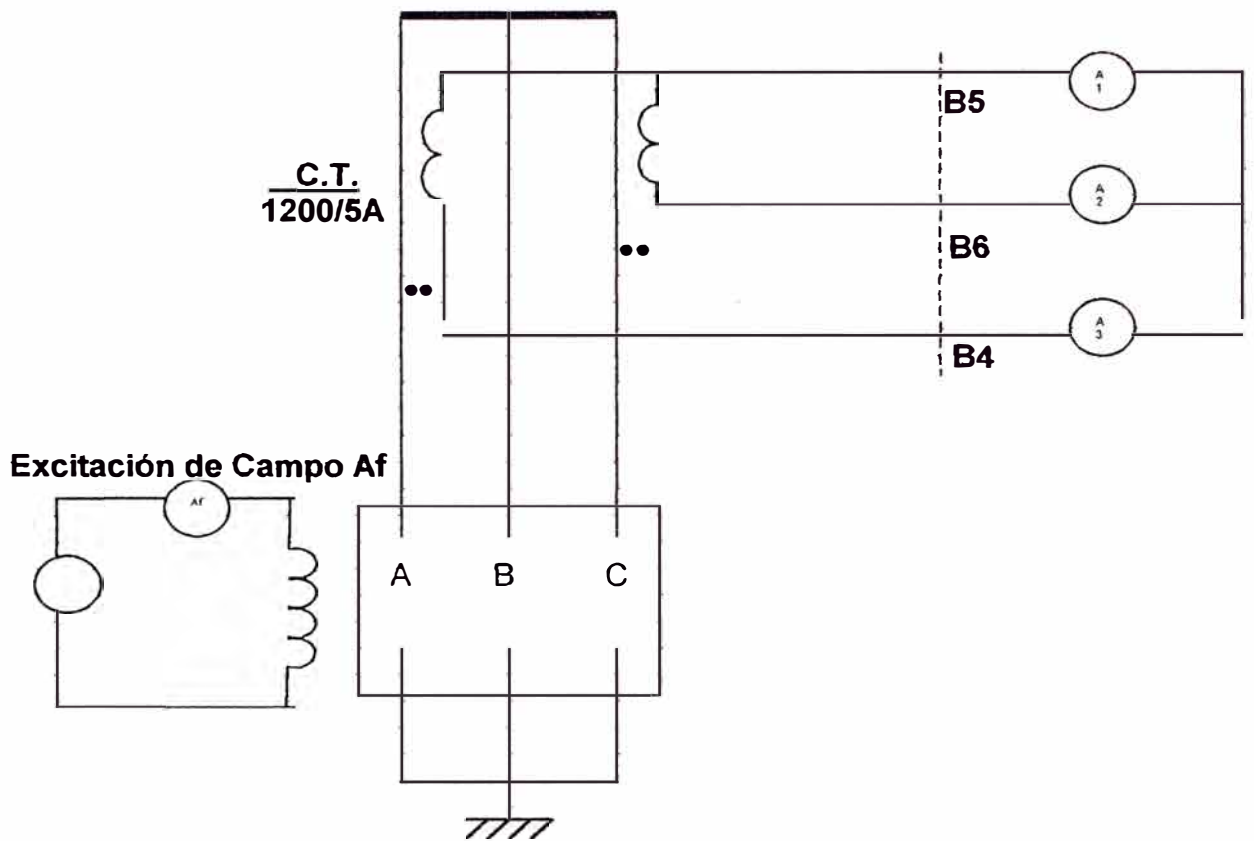


Figura 5.13. Circuito Eléctrico para la prueba de corto circuito

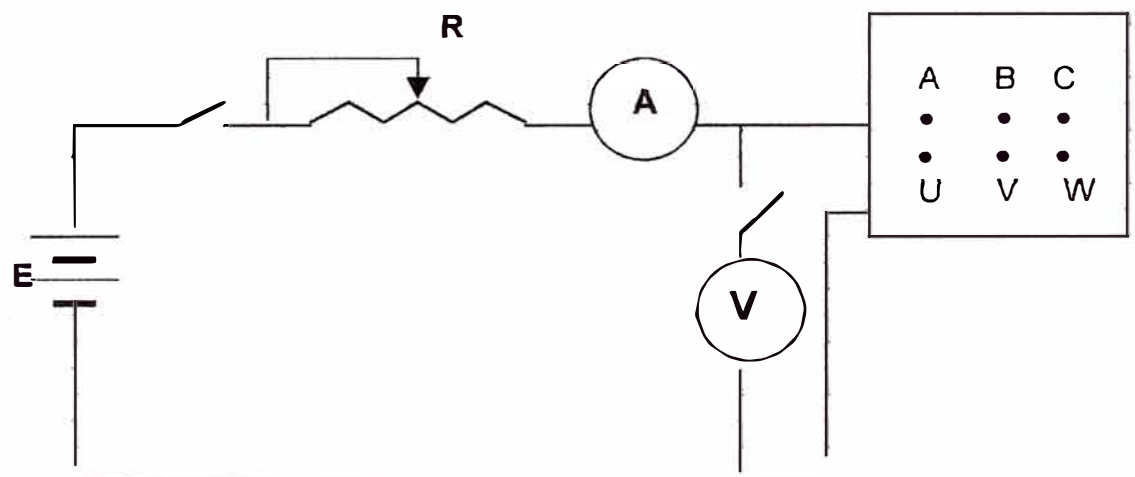


Figura 5.14. Circuito Eléctrico para la prueba de resistencias.

### 5.2.2.2 Equipos e instrumentos de Prueba.

Af = Pinza amperimetrica DC 0-1000<sup>a</sup>.

A1, A2, A3 = Amperímetros patrón 0-5 A.

## 5.3 Medición de Parámetros

### 5.3.1 Resistencia de los Devanados del Estator

#### 5.3.1.1 Procedimiento

El método empleado será el de caída de tensión teniendo cuidado que la corriente sea la menor posible para que no afecte a la medida de la resistencia por calentamiento de los conductores (1 amperio para el caso del estator) Es importante que se determine la temperatura del devanado de una manera muy exacta en el momento en que se efectúa la medida de la resistencia. El circuito de medida se presenta en la figura 5.14 y los datos serán registrados en la tabla 5.9.

Corregir los valores de las resistencias a 75°C según la formula.

$$R_1 = R_2 \frac{234.5 + T_1}{234.5 + T_2} \longrightarrow \boxed{R_{75^\circ\text{C}} = \frac{309^\circ\text{C}}{234.5 + T_{\text{med}}}}$$

T<sub>med</sub> = Temperatura del Bobinado.

#### 5.3.1.2 Equipos e Instrumentos

E = Fuente de tensión DC (2 baterías de 12 V. mínimo)

R = Potenciometro de 15 ohm, 5 Amp.

A = Amperímetro DC 0 – 2.5 – 5 A.

R.P.M.

TENSION DE LINEA			PROMEDIO DE TENSION V	CORRIENTE DE CAMPO A
A-B	B-C	C-A		

Tabla 5.7 Tabla de reporte de prueba de vacío

R.P.M.=

CORRIENTE DE LINEA			PROMEDIO DE CORRIENTE A	CORRIENTE CAMPO
A	B	C		

Tabla 5.8 Tabla de reporte de prueba de corto circuito

FASE	TENSION V	CORRIENTE A	TEMPERATURA DEVANADO	RESISTENCIA DEVANADO	RESISTENCIA A 75°C
A-B					
B-C					
C-A					
ROTOR					

Tabla 5.9 Tabla Lectura medición de resistencias

### 5.3.2 Determinación de la Reactancia Sincrona $X_d$

#### 5.3.2.1 Procedimiento

En base a las curvas características en vacío y en corto circuito obtenidas en las pruebas anteriores se determina el valor de la reactancia sincrona directa  $X_d$  y la relación de cortocircuito  $K_o$ .

- Tensión Nominal:  $V_n = 13.8 \text{ kV.}$
- Corriente Nominal:  $I_n = 1004 \text{ A.}$
- Corriente de excitación correspondiente a  $I_n$   
sobre la característica de corto circuito  $I_{fk} = \quad \text{A.}$
- Corriente de excitación correspondiente a  $V_n$   
sobre la característica de entrehierro  $I_{fg} = \quad \text{A.}$
- Corriente de excitación correspondiente a  $V_n$   
sobre la característica de saturación en vacío  $I_{fo} = \quad \text{A.}$

$$X_d = \frac{I_{fk}}{I_{fs}} = \quad \text{p.u.}$$

$$X_c = \frac{I_{fo}}{I_{fk}} = \quad \text{p.u.}$$

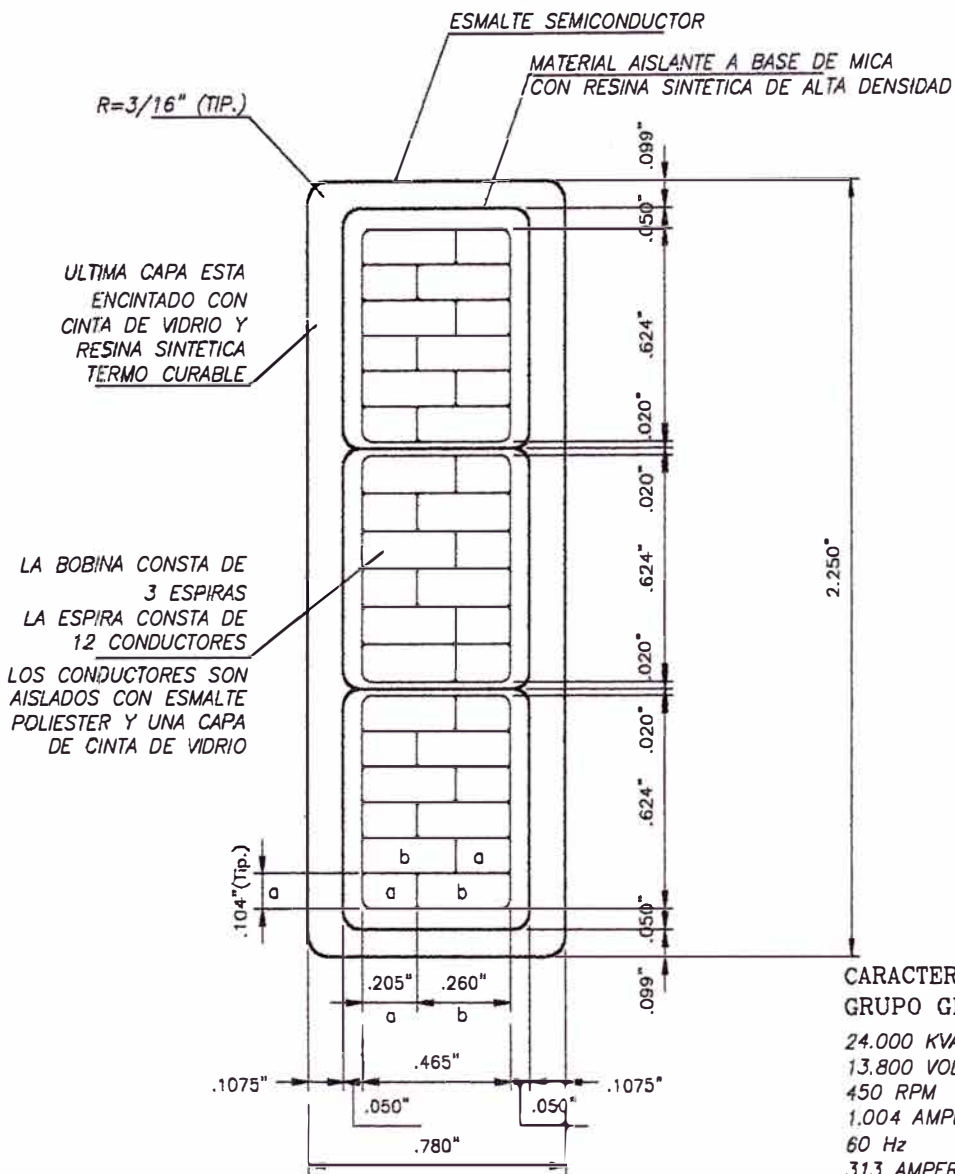
**CAPITULO VI**  
**APLICACIÓN: REPARACION DEL GENERADOR SINCRONO DE LA**  
**UNIDAD N°2 UBICADA EN LA CENTRAL HIDROELECTRICA DE YAUPI**

**6.1 Características Técnicas de la Unidad n°2**

**6.1.1 Datos Técnicos**

**6.1.1.1 Características de funcionamiento del Generador Sincrono N°2**

<b>Potencia</b>	24 MVA
<b>Tensión</b>	13.8 kV.
<b>Amperaje</b>	1005A
<b>Factor de potencia</b>	0.9
<b>Fases</b>	3
<b>Frecuencia</b>	60Hz.
<b>N° de Polos</b>	16
<b>Velocidad</b>	450RPM
<b>Temperatura de Servicio</b>	60°C
<b>N° de Bobinas</b>	180
<b>N° Grupos</b>	48
<b>Fabricante</b>	WESTINHOUSE
<b>Series</b>	2S 46P240
<b>Paso de Bobina</b>	1-11
<b>Exc. Amp.</b>	366 ADC
<b>Exc. Volts</b>	250 VDC

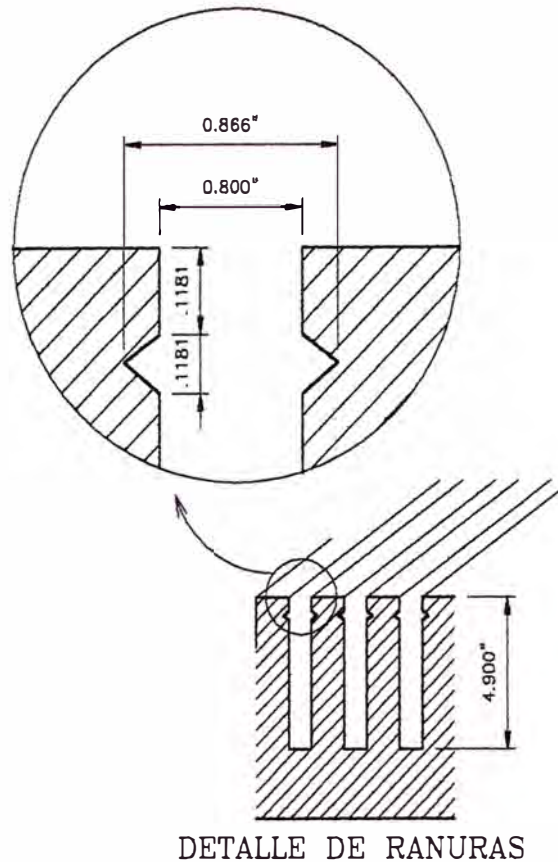


$R=3/16"$  (TIP.)

ULTIMA CAPA ESTA ENCINTADO CON CINTA DE VIDRIO Y RESINA SINTETICA TERMO CURABLE

LA BOBINA CONSTA DE 3 ESPIRAS  
LA ESPIRA CONSTA DE 12 CONDUCTORES  
LOS CONDUCTORES SON AISLADOS CON ESMALTE POLIESTER Y UNA CAPA DE CINTA DE VIDRIO

SECCION TIPICA DE LA BOBINA



DETALLE DE RANURAS

CARACTERISTICAS DE FUNCIONAMIENTO  
GRUPO GENERADOR N°5

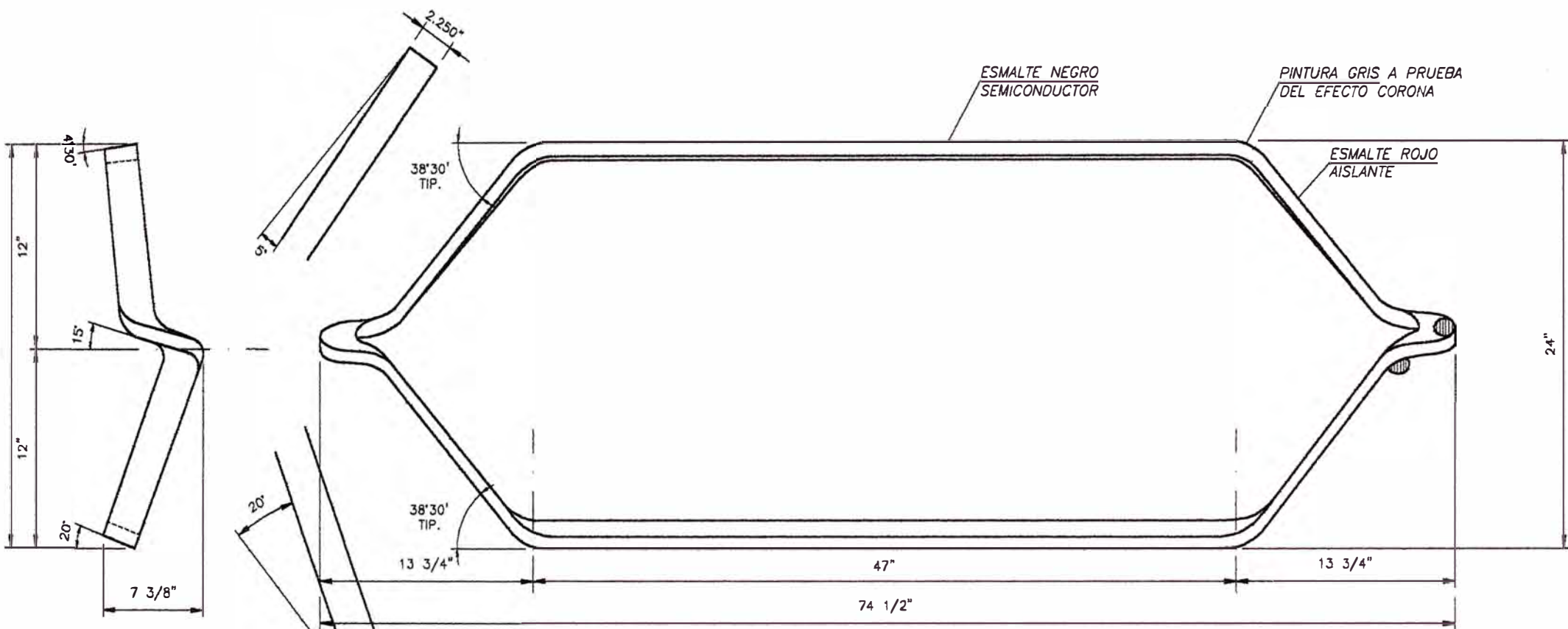
24.000 KVA  
13.800 VOLTIOS  
450 RPM  
1.004 AMPERIOS  
60 Hz  
313 AMPERIOS (MAXIMA CORRIENTE DE CAMPO)  
SERIE: N° 17532  
P.F.: 0.9  
REGIMEN: CONTINUO  
POLOS: 16 UNIDADES  
CODIGO: ASAC50  
AÑO: 1967 FEBRERO  
MARCA: MITSUBISHI ELECTRIC CORP. JAPAN  
CONEXION: DOBLE ESTRELLA  
# BOBINAS: 180

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA

FAC. DE INGENIERIA ELECTRICA Y ELECTRONICA

PROYECTO :  
REBOBINADO DEL GENERADOR UNIDAD N° 2 C.H.E. YAUPI

ASESOR :	T.P.G.	PLANO :	FECHA :
GRADUANTE :	WILFREDO MENDOZA	DETALLES DE LA BOBINA ESTATORICA	AGTO. - 2002
DIBUJANTE :	C.R.R.		ESCALA : 3/16":1", 3":1"



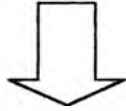
PLANTA



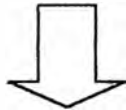
ELEVACION

### 6.1.2.1 Descripción de los trabajos a efectuarse

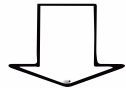
A.-Desamarre y extracción de cuñas de las cabezas de bobinas de los grupos del 1 al 4 (bobina N° 1 del grupo 1 fase b fallada)



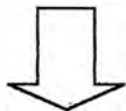
B.- Desamarre y extracción de cuñas del anillo de ajuste



C.- Descencintado de los empalmes entre bobinas y desconexión entre ellas

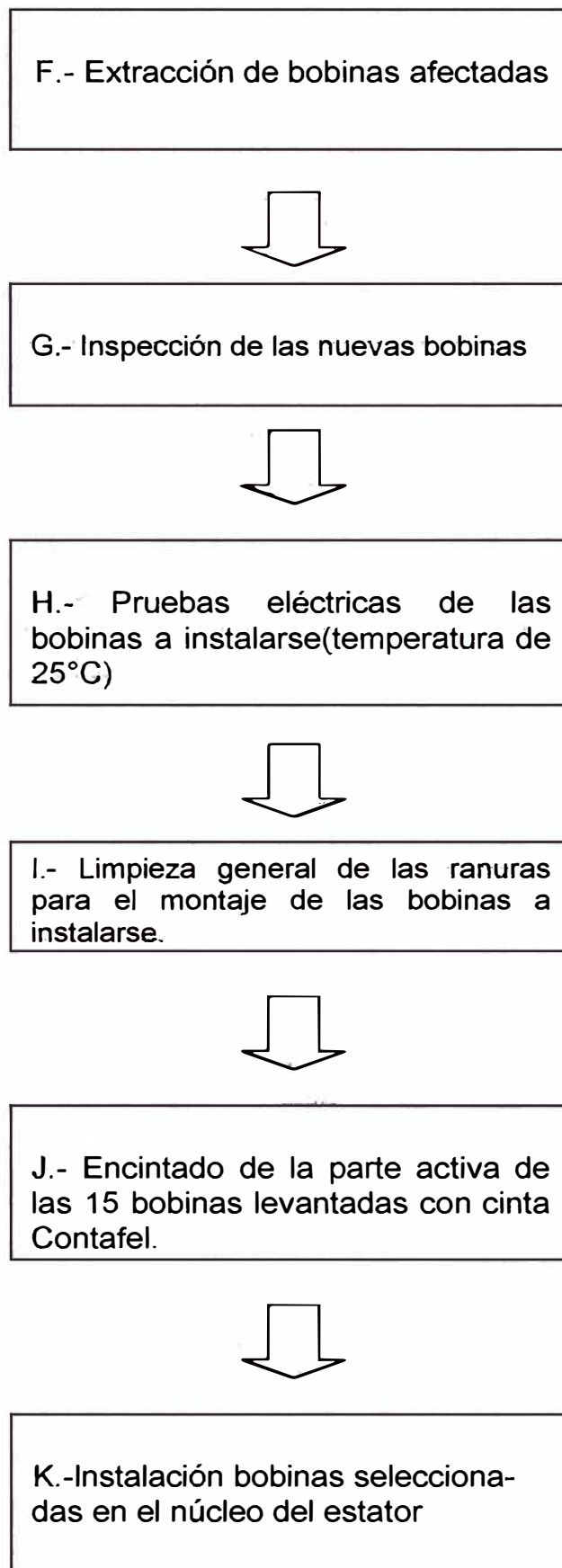


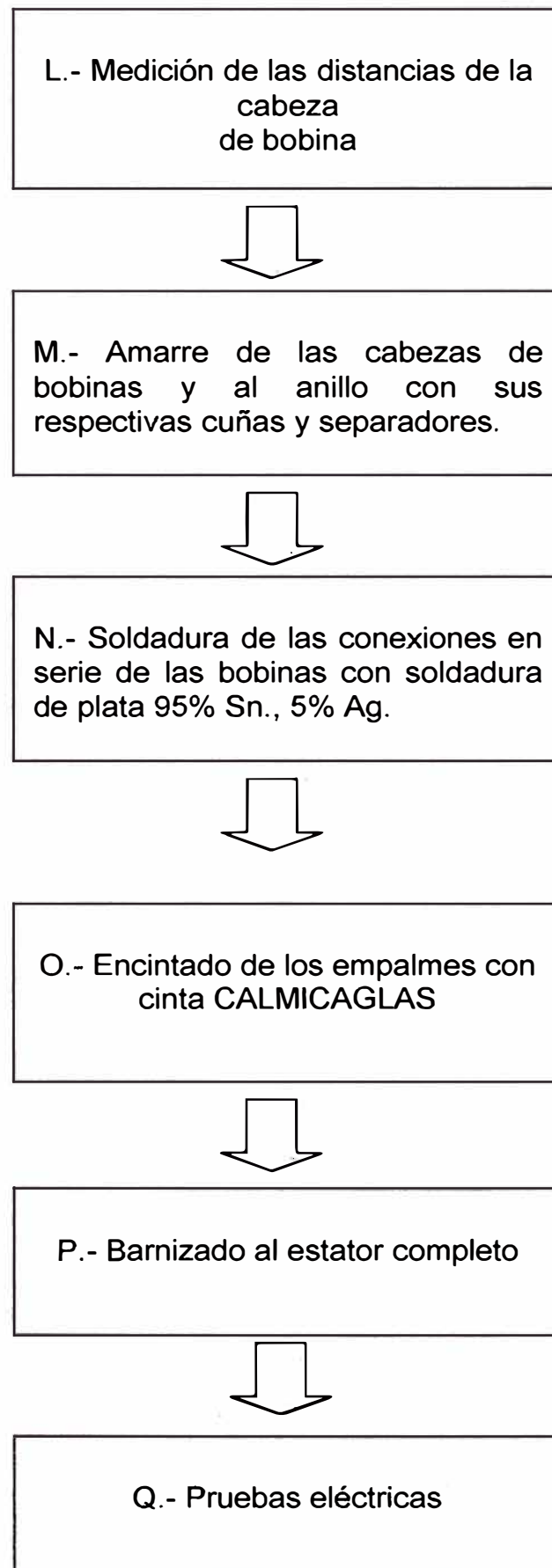
D.- Extracción de las cuñas de la ranura, de la parte activa de las bobinas de las ranuras del 1 al 11



E.- Preparación de sujetadores para los tecles laterales







## **6.2 Pruebas Eléctricas**

### **6.2.1 Equipos e instrumentos utilizados.**

Los equipos e instrumentos más importantes utilizados en las pruebas eléctricas son:

- Megger de 5000 VDC.
- Puente de Medición de Capacitancias y Factor de Disipación CB 100 Multi Amp
- Transformador variable de 440 / 150 – 800 VAC 200 KVA. Peso Aprox. 2500 Kg.
- Transformador monofasico 440/1200 VAC 50 KVA.
- Termómetro de rayos infrarrojo para medición de temperatura ambiente.
- Transformador de tensión 14,400/120
- Transformador de corriente 20/5
- Voltímetro Digital
- Pinza Amperimetrica digital

### **6.2.2 Pruebas de Aislamiento**

#### **6.2.2.1 Medición de la resistencia y evaluación del Índice de Polarización**

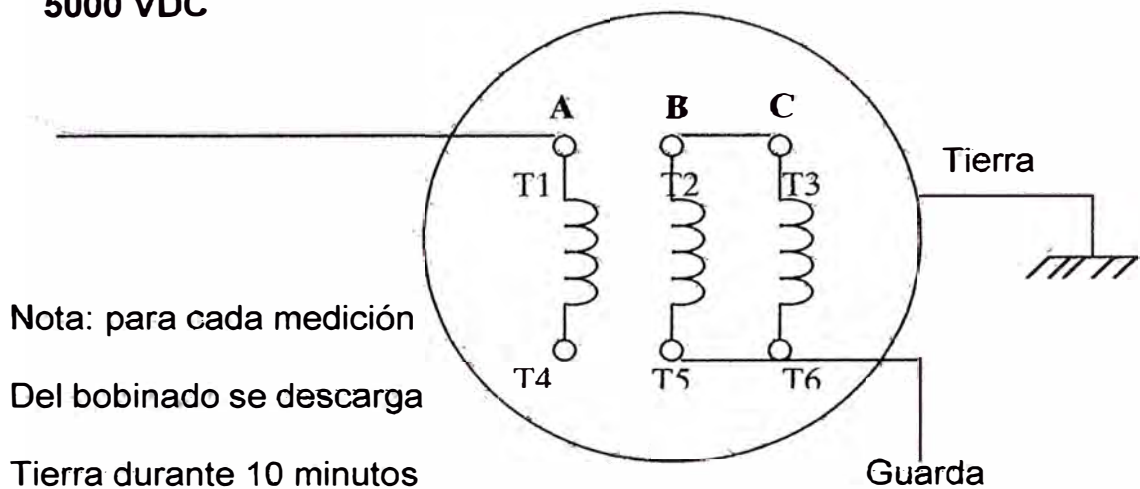
Las mediciones de estas pruebas se detallan en la tabla 6.1

#### **Evaluación**

El 04 de diciembre de 1999 previo al secado del bobinado estatorico se realizo una medición de la resistencia de aislamiento y evaluamos el índice de polarización, bajo el esquema de conexión siguiente.

## Tensión Megger

5000 VDC



**Figura 6.1** Circuito de prueba Índice de Polarización

Los índices de polarización resultantes en esta fecha, son menores que el valor aceptante de 2, por consiguiente será necesario realizar el proceso de calentamiento para extraer la humedad.

Se inicia el proceso de secado del bobinado estatorico, bajo las siguientes condiciones de operación:

- Operación de la unidad con los bornes de las fases del estator en cortocircuito
- Giro del rotor alrededor 150 RPM.
- Tensión de Campo  $V_f = 50$  VDC.
- Corriente de campo  $I_f = 80$  ADC.
- Corriente de línea  $I = 550$  AAC.
- Calentadores en la parte inferior del generador: 5 x 3000W.

La temperatura del bobinado estatórico llega a 70°C promedio, alcanzando finalmente a 67°C al termino del proceso el día 05 de

**RESISTENCIA DE AISLAMIENTO - INDICE DE POLARIZACION**

FECHA	HORA	TEMPERATURA ESTATOR °C			RESISTENCIA DE AISLAMIENTO(MOHM) - INDICE DE POLARIZACION								
		BOBINA			A-N			B-N			C-N		
		1	3	5	R 1min	R 10min	IP	R 1min	R 10min	IP	R 1min	R 10min	IP
04/12/99	8:30	40.00	37.00	36.50	1250	1825	1.46	975	1650	1.69	985	1750	1.78
06/12/99	8:30	40.00	37.30	38.00	2500	7000	2.80	2600	7500	2.88	3400	12000	3.53
<b>PRUEBA DE RESISTENCIA DE AISLAMIENTO DESPUES DE LA TENSION APLICADA</b>													
06/12/99	16:00	40	37.5	38	2800	8500	3.04	2600	8000	3.08	3400	12500	3.68

**TABLA 6-1**

diciembre de 1999 en que se paro el giro del rotor, permitiendo enseguida el enfriamiento lento para efectuar nuevamente la evaluación del índice de polarización.

El día 06 de diciembre al realizar las pruebas los resultados del índice de polarización fueron mayores que 2 como se podrá observar en la tabla 6.1, por consiguiente el aislamiento se encontraba en optimas condiciones y se paso a la siguiente prueba.

#### **6.2.2.2 Prueba dieléctrica de Alta Tensión del Estator.**

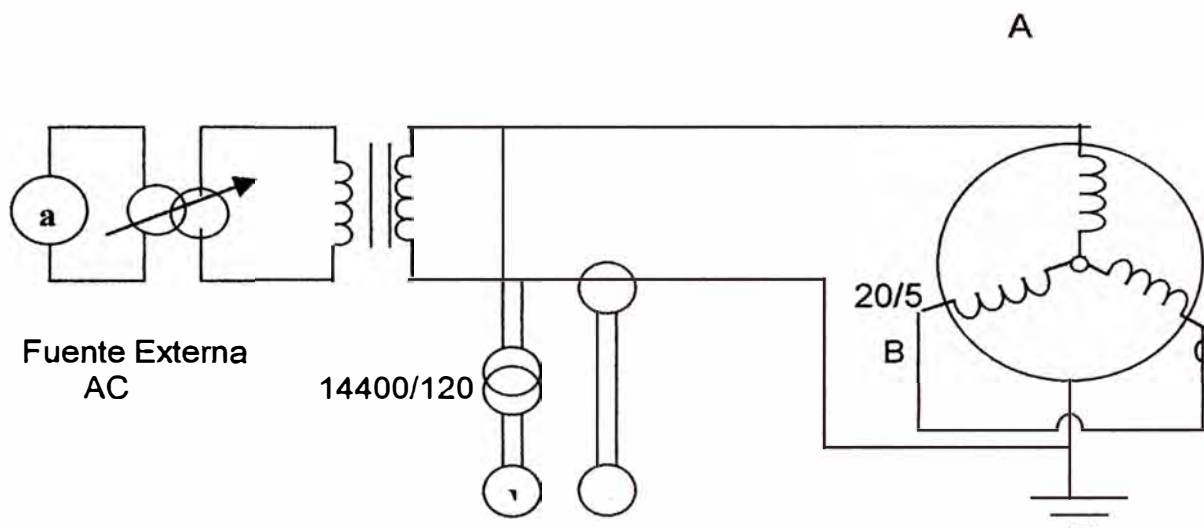
El día 06 de diciembre se realizo la prueba de tensión aplicada.

Para determinar el valor de la tensión de prueba se deberá tener en cuenta los años de servicio después de su construcción, Para un bobinado nuevo el valor de la tensión aplicada previa a su aceptación será de  $(2E + 1)$ kV. , pero de acuerdo con la curva de estimación de Tensión Antes Ruptura del aislamiento del estator suministrada por el fabricante este valor será afectado por 0.4%.

$$\text{Tensión de prueba} = (2 \times 13.8 + 1) \text{ kV} \times 0.35 = 11.44 \text{ kV.}$$

La prueba de tensión aplicada se realizó bajo el esquema siguiente.

**TRV 200KVA    TT 50KVA**  
**440/150-800VA    440/12000VAC**



**Figura 6.2** Circuito eléctrico para la prueba de tensión aplicada

BOBINA	TENSION DE PRUEBA(Kv.)	CORRIENTE ( Amperios )	TIEMPO (Minuto)	OBSERVACIONES
A	11.53	1.44	1	BUENO
B	11.53	1.44	1	BUENO
C	11.53	1.44	1	BUENO
ROTOR	0.9	0.08	1	BUENO

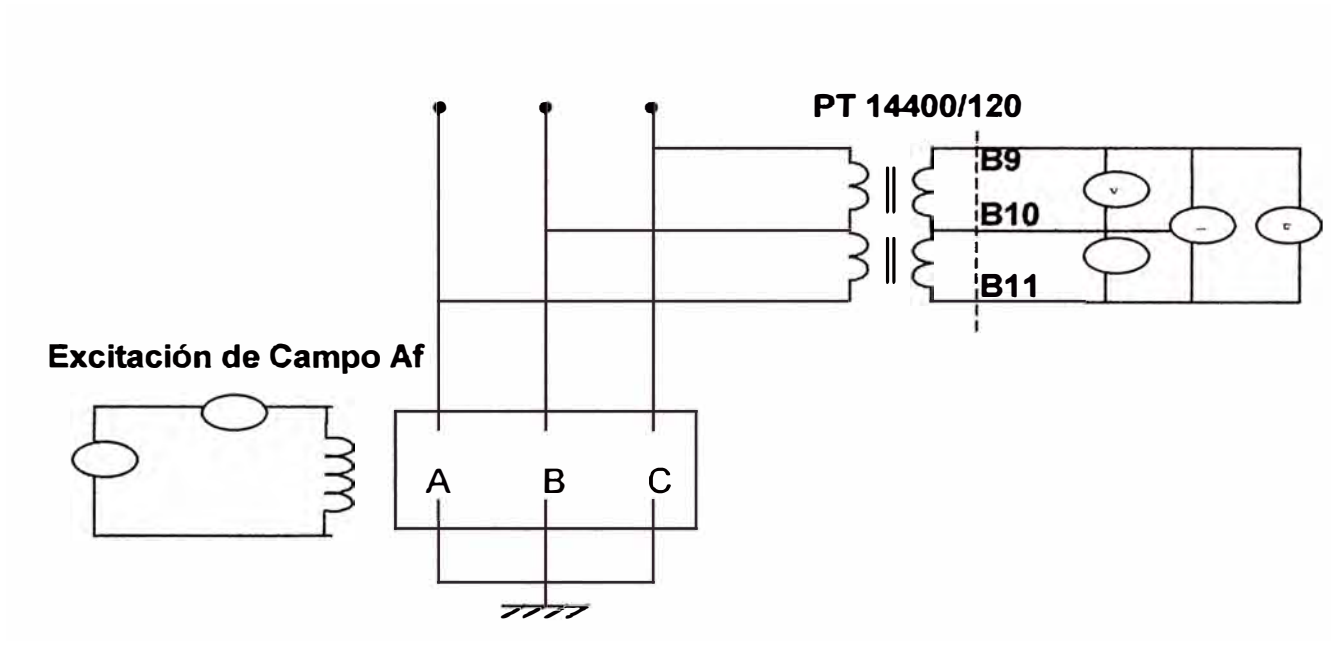
**Tabla 6.2** Resultados de la prueba de tensión aplicada

### 6.2.2.3 Medición de la Capacitancia y el Factor de Disipación

El esquema típico de conexión para realizar esta medición será el de la figura 5.11a figura 5.11b, figura 5.11c, cuyos resultados se pueden observar en las tablas 6.2, tabla 6.3, tabla 6.4.

## 6.2.3 Pruebas de características del Generador sincronos.

### 6.2.3.1 Pruebas características en vacío



**Figura 6.3** Circuito Eléctrico para la prueba de vacío



## REPORTE DE PRUEBAS

### PUENTE DE MEDICION CB 100, DE CAPACITANCIAS Y FACTOR DE DISIPACION DE AISLAMIENTO

#### GENERADOR SINCRONO

I. INFORMACION GENERAL	II. CARACTERISTICAS DE PLACA	III. CONDICIONES AMBIENTALES
<b>Fecha:</b> 06-12-99 <b>Ubicación:</b> CHE YAUPI <b>Equipo:</b> Unidad N° 2	<b>Fabricante:</b> Westinghouse <b>N°:</b> 25-46P240 <b>Año:</b> 1957 <b>Potencia:</b> 24 MVA. <b>Voltaje:</b> 13.8 kV. <b>F.P.:</b> 0.9 <b>Hz:</b> 60	<b>Temp. Amb.:</b> 21.5 °C <b>Humedad Relativa %:</b> 95 <b>Observaciones.:</b>

#### IV. MEDICIONES : Configuración I (figura 5.11a)

CONEXIONES DE PRUEBA	LECTURA DE CAPACITANCIAS				FACTOR DE DISIPACION			
	Mult. sw.	x	Cap. sw+dial	Total (µF.)	Rango (%)	Lectura (Dial)	Total (%)	Corrección a 20°C (%)
1 Cap H - L								
2 Cap H - G, ( L - GUARD )	0.02	x	6.611	= 0.13222	0 - 10	209	2.09	A-G
3 Cap L - G, ( H - GUARD )	0.02	x	6.631	= 0.13262	0 - 10	208	2.08	B-G
4 Cap [ H - L + H - G ], ( L - GND )	0.02	x	6.802	= 0.13604	0 - 10	222	2.22	(A-B)+(A-G)
5 Cap [ L - H + L - G ], ( H - GND )	0.02	x	6.822	= 0.13644	0 - 10	221	2.21	(A-B)+(B-G)

#### V. INFORMACION ADICIONAL

**Observaciones:** El presente trabajo de reparación parcial se realizo bajo condiciones de emergencia, dado que se debía de atender una demanda de energía eléctrica establecida por el COES.

**Motivo de la prueba:** Cambio de 4 Bobinas estatoricas  
**Realizado por:** Wilfredo Mendoza    **N° Pagina:** 01

Tabla 6.2

## REPORTE DE PRUEBAS

### PUENTE DE MEDICION CB 100, DE CAPACITANCIAS Y FACTOR DE DISIPACION DE AISLAMIENTO

#### GENERADOR SINCRONO

I. INFORMACION GENERAL	II. CARACTERISTICAS DE PLACA	III. CONDICIONES AMBIENTALES
<b>Fecha:</b> 06-12-99 <b>Ubicación:</b> CHE YAUPI <b>Equipo:</b> Unidad N° 2	<b>Fabricante:</b> Westinghouse <b>N°:</b> 25-46P240 <b>Año:</b> 1957 <b>Potencia:</b> 24 MVA. <b>Voltaje:</b> 13.8 kV. <b>F.P.:</b> 0.9 <b>Hz:</b> 60	<b>Temp. Amb.:</b> 21.5 °C <b>Humedad Relativa %:</b> 95 <b>Observaciones.:</b>

#### IV. MEDICIONES : Configuración II (Ver figura 5.11b)

CONEXIONES DE PRUEBA	LECTURA DE CAPACITANCIAS			FACTOR DE DISIPACION			
	Mult. sw.	Cap. sw+dial	Total (µF.)	Rango (%)	Lectura (Dial)	Total (%)	Corrección a 20°C (%)
1 Cap H - L							
2 Cap H - G, ( L - GUARD )	0.02	x	6.632 = 0.13264	0 - 10	208	2.08	B-G
3 Cap L - G, ( H - GUARD )	0.02	x	6.651 = 0.13302	0 - 10	206	2.06	C-G
4 Cap [ H - L + H - G ], ( L - GND )	0.02	x	6.821 = 0.13642	0 - 10	221	2.21	(B-C)+(B-G)
5 Cap [ L - H + L - G ], ( H - GND )	0.02	x	6.839 = 0.13678	0 - 10	219	2.19	(B-C)+(C-G)

#### V. INFORMACION ADICIONAL

**Observaciones:** El presente trabajo de reparación parcial se realizo bajo condiciones de emergencia, dado que se debía de atender una demanda de energía eléctrica establecida por el COES.

**Motivo de la prueba:** Cambio de 4 Bobinas estatoricas  
**Realizado por:** Wilfredo Mendoza    **N° Pagina:** 02

Tabla 6.3

## REPORTE DE PRUEBAS

### PUENTE DE MEDICION CB 100, DE CAPACITANCIAS Y FACTOR DE DISIPACION DE AISLAMIENTO

#### GENERADOR SINCRONO

I. INFORMACION GENERAL	II. CARACTERISTICAS DE PLACA	III. CONDICIONES AMBIENTALES
<b>Fecha:</b> 06-12-99 <b>Ubicación:</b> CHE YAUPI <b>Equipo:</b> Unidad N° 2	<b>Fabricante:</b> Westinghouse <b>N°:</b> 25-46P240 <b>Año:</b> 1957 <b>Potencia:</b> 24 MVA. <b>Voltaje:</b> 13.8 kV. <b>F.P.:</b> 0.9 <b>Hz:</b> 60	<b>Temp. Amb.:</b> 21.5 °C <b>Humedad Relativa %:</b> 95 <b>Observaciones.:</b>

#### IV. MEDICIONES : Configuración III (Ver figura 5.11c)

CONEXIONES DE PRUEBA	LECTURA DE CAPACITANCIAS				FACTOR DE DISIPACION			
	Mult. sw.	x	Cap. sw+dial	Total (µF.)	Rango (%)	Lectura (Dial)	Total (%)	Corrección a 20°C (%)
1 Cap H - L								
2 Cap H - G, ( L - GUARD )	0.02	x	6.661	= 0.13322	0 - 10	206	2.06	C-G
3 Cap L - G, ( H - GUARD )	0.02	x	6.622	= 0.13244	0 - 10	209	2.09	A-G
4 Cap [ H - L + H - G ], ( L - GND )	0.02	x	6.839	= 0.13678	0 - 10	219	2.19	(C-A)+(C-G)
5 Cap [ L - H + L - G ], ( H - GND )	0.02	x	6.8	= 0.136	0 - 10	222	2.22	(C-A)+(A-G)

#### V. INFORMACION ADICIONAL

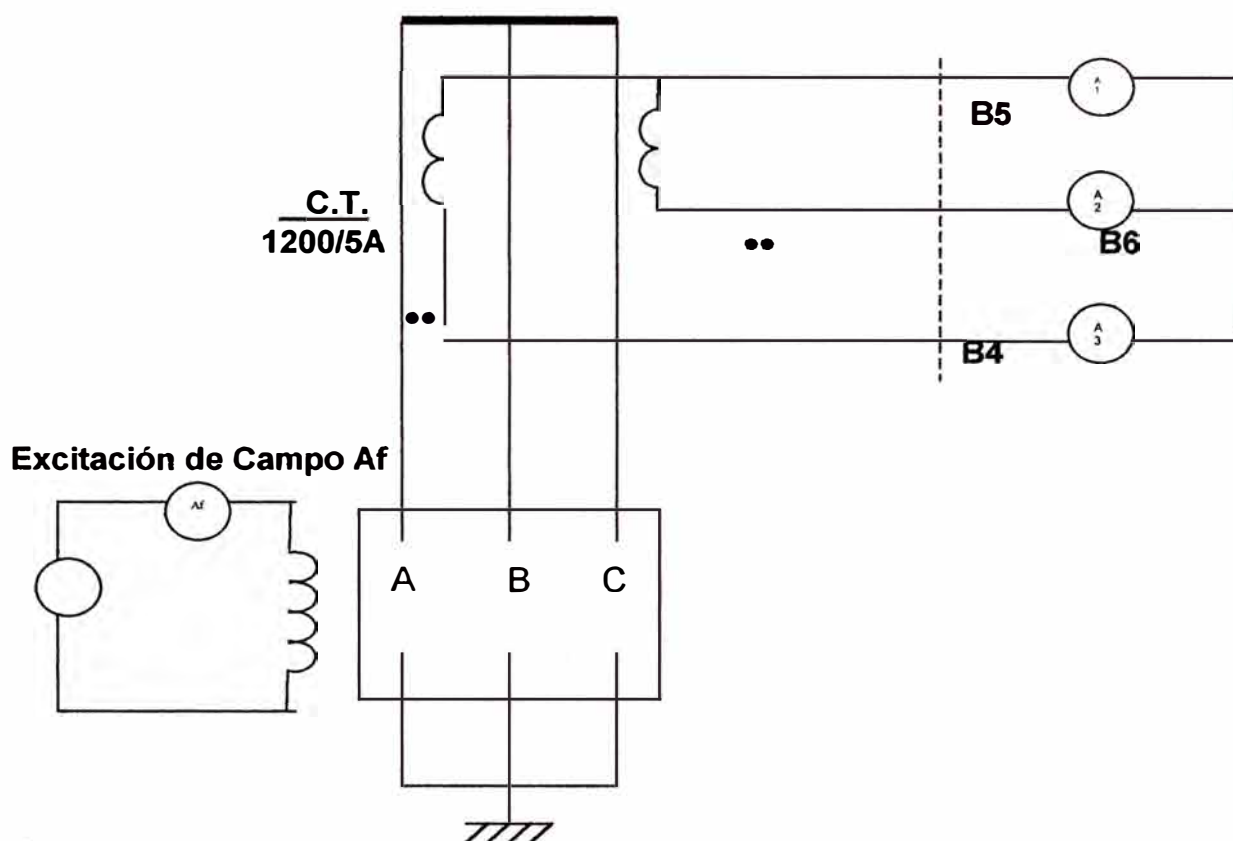
**Observaciones:** El presente trabajo de reparación parcial se realizo bajo condiciones de emergencia, dado que se debía de atender una demanda de energía eléctrica establecida por el COES.

**Motivo de la prueba:** Cambio de 4 Bobinas estatoricas  
**Realizado por:** Wilfredo Mendoza    **N° Pagina:** 03

Tabla 6.4

Tensión de Línea			Tensión Promedio	Corriente de Campo If (A)
A-B	B-C	C-A		
3315	3315	3315	3315	40
5260	5260	5260	5260	62
5715	5715	5715	5715	65
7315	7315	7315	7315	82
8000	8000	8000	8000	93
9145	9145	9145	9145	109
10060	10060	10060	10060	120
11430	11430	11430	11430	136
11890	11890	11890	11890	141
13260	13260	13260	13260	167
13720	13720	13720	13720	170
14860	14860	14860	14860	189
16000	16000	16000	16000	218
16230	16230	16230	16230	225
17000	17000	17000	17000	246
17300	17300	17300	17300	255
15660	15660	15660	15660	205
14860	14860	14860	14860	185
14520	14520	14520	14520	175
13720	13720	13720	13720	158
13260	13260	13260	13260	150
12120	12120	12120	12120	132

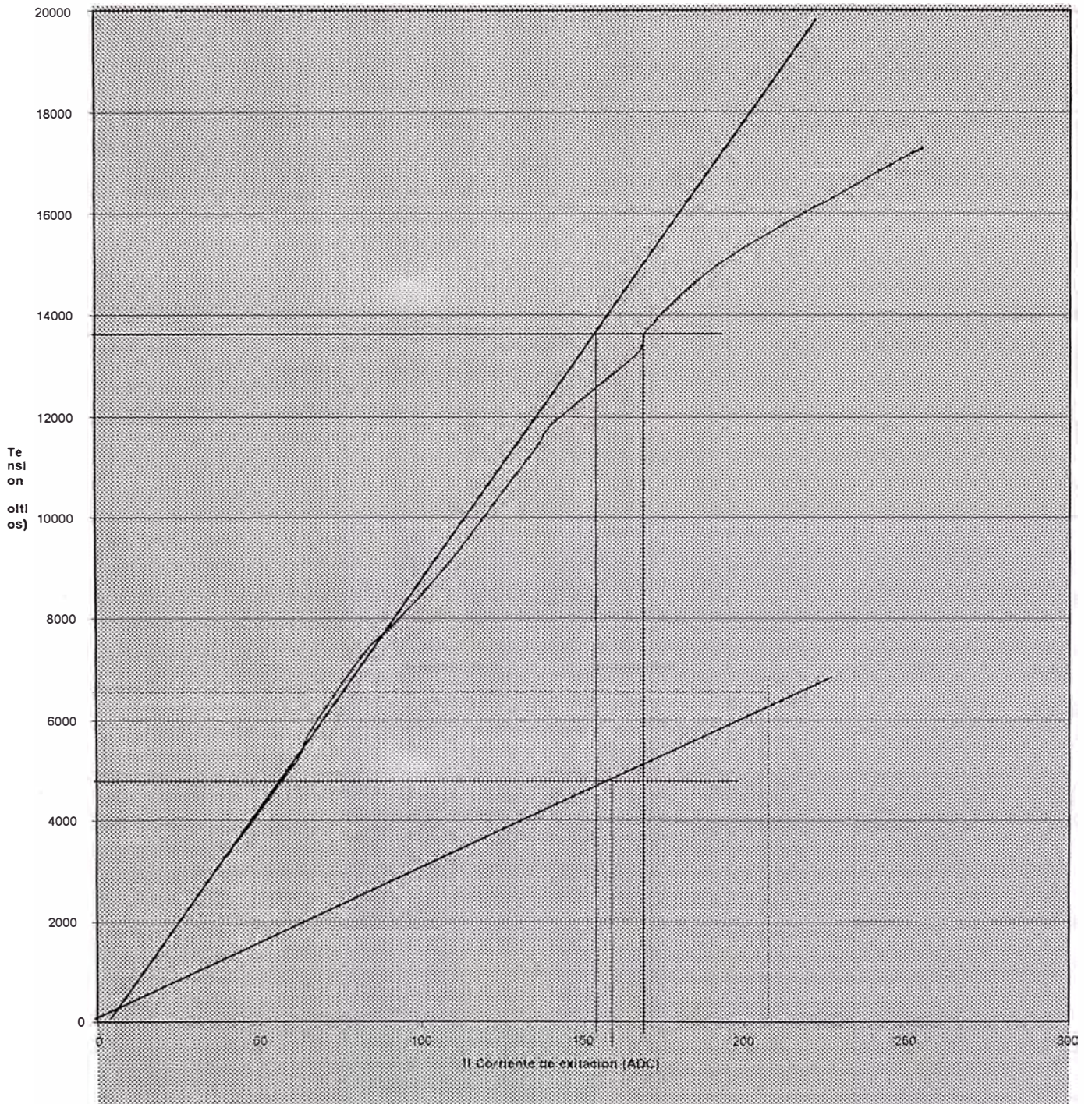
### 6.2.3.2 Pruebas características en corto circuito



**Figura 6.4** Circuito Eléctrico para la prueba de corto circuito

Corriente de	de	Línea	Corriente Promedio	Corriente de Campo If (A)
A	B	C		
164	164	164	164	28
264	264	264	264	47
384	384	384	384	66
548	548	548	548	94
695	695	695	695	116
864	864	864	864	143
972	972	972	972	162
1019	1019	1019	1019	175
1306	1306	1306	1306	205

### Curva de Vacío



**I<sub>fk</sub> = 160    I<sub>fg</sub> = 155    I<sub>fo</sub> = 170**

## 6.2.4 Pruebas de parámetros del generador síncronos

### 6.2.4.1 Resistencia de los devanados del estator

Fase	Tensión VDC	I D.C	Temperatura Devanado	Resistencia Devanado	Resistencia 75 °C
A	24	104.4	41.7 °C	0.023	0.0258
B	24	110	41.7 °C	0.022	0.0247
C	24	110	41.7 °C	0.022	0.0247

### 6.2.4.2 Determinación de la reactancia síncrona.

Corriente de Excitación Correspondiente  $I_{fo} = 160$  a Tensión Nominal sobre la característica de saturación de Vacío

$$X_d = \frac{I_{fk}}{I_{fg}} = \frac{160}{155} = 1.03 \text{ p.u.}$$

$$K_c = \frac{I_{fo}}{I_{fk}} = \frac{170}{160} = 1.06 \text{ p.u.}$$

## CONCLUSIONES

1. El calculo cuantitativo y cualitativo del Campo Eléctrico, por el método de simulación de cargas lineales nos provee de resultados del campo eléctrico promedio, así como también del campo eléctrico máximo generado por el efecto de borde del conductor eléctrico.

$$E_{\text{promedio}} = 3.940 \text{ kV/mm}$$

$$E_{\text{máximo}} = 9.483 \text{ kV/mm}$$

estos valores nos permiten lo siguiente:

Seleccionar el material dieléctrico adecuado, suficiente y necesario para el rebobinado general del sistema de aislamiento de los generadores síncronos de alta tensión. Como por ejemplo para este caso, en el capítulo III de los dieléctricos en lo referente a los materiales de última generación el Kapton cuya Rigidez Dieléctrica (ver tabla 3.2) esta por el orden de 154 kV/mm., y la Rigidez Dieléctrica del Calmicaglass (ver tabla 3.9) esta por el orden de 50 kV/mm., de acuerdo con estos valores podemos concluir que el material adecuado para este propósito podría ser ambos, pero aquí entra el factor económico cuya relación de costos entre el kapton y el calmicaglas es de 3/1, lo que nos permite escoger entre los dos materiales al mas adecuado para este propósito.

Esta herramienta del calculo de simulación de cargas lineales nos permite demostrar el efecto de borde que tocamos en el capítulo IV,



basado en el teorema de Schwarz Christoffel que para nuestro caso  $S=3.5\text{mm}$   $R=0.7937\text{mm}$  ( $1/32''$ ) entonces  $S/R = 4.4$ , luego de la curva de la figura 4.1 obtenemos  $E_{\text{max}}/E_{\text{promedio}} = 2.4$  que es el mismo resultado hallado por el método computacional.

2. Utilizando las características cualitativas del campo eléctrico en el dieléctrico de la ranura suministrado por el método computacional, podemos deducir que frente a un vacío en  $V$ , en la zona entre la superficie de la bobina y los bornes del núcleo magnético las líneas de gauss se dispersan en el dieléctrico para concentrarse en el vacío de aire proporcional a la constante dieléctrica del aislante, lo que origina las descargas parciales cuya manifestación principal es la degradación del aislamiento. Para la solución de este problema se usa siempre un relleno de cinta semiconductor de baja resistencia que permita poner a un mismo potencial al vacío y que a la vez no permita corto circuito entre las placas del núcleo magnético. Esta cinta se llama CONTAFEL, y en este aspecto se deberá tener mucho cuidado cuando se instale la parte activa de la bobina para que los ajustes y el relleno sean precisos.
3. Un adecuado método de Control de Gradiente hace posible la prevención del efecto corona en la porción de la ranura de una bobina del estator de alta tensión, para nuestro caso particular se realizó por el método de crear una capa de pintura semiconductor de alta resistencia cuyo valor de resistencia varíe de acuerdo a la tensión que se deberá

controlar, para nuestro caso 28.6 kV., Esta pintura es el barniz graduante de tensión 8002 cuyo valor promedio es de 2 kV/cm., entonces la longitud de capa que se utilizo fue de 14.3 cm. con un traslape de 25 mm con la pintura semiconductora de baja resistencia. La descarga del efecto corona en el final del bobinado puede ser controlado hasta niveles bajos aceptados en condiciones de operación, a través del uso de las pinturas semiconductores de alta resistencia que deberá ser traslapada a la extensión de la pintura semiconductora de ranura de baja resistencia, utilizando la distancia correcta y suficiente del entrehierro de bobinas.

4. Para el caso particular del generador sincrónico de alta tensión en la C.H.E Yaupi la distancia del entrehierro entre bobinas ( $t$ ) es de 50.8 mm., la tensión de trabajo es de 13.8 kV., el valor de la tensión de la prueba dieléctrica de alta tensión ( $V$ ) sería 28.6 kV, para un espesor de aislamiento ( $d$ ) de 3.5 mm., y un coeficiente dieléctrico ( $\epsilon$ ) del calmicaglass de 4.5 y de la ecuación 4.4 obtenemos

<b>T ( mm )</b>	<b>Vi ( kV )</b>	<b>Ei ( kv/mm )</b>	<b>Va(kV)</b>	<b>Ea (kV/mm)</b>	<b>CSV</b>
50.8	0.43	0.1228	27.74	0.546	60

La CVS Tensión de inicio corona en el aire a 760 mmHg es de 60 kV y por un factor de corrección por altitud y temperatura 0.73 entonces la tensión CVS será 43.8 kV. y la tensión en el entrehierro es de 27.74 kV, lo que nos indica que no existirá descargas por efecto corona causadas por distancias entre bobinas de diferente fase.

5. De las pruebas D.C. podemos concluir que estas pruebas si son aplicadas correctamente nos proporcionan un medio NO DESTRUCTIVO de evaluación de las condiciones de aislamiento.
6. Las pruebas de Factor de Potencia y Factor de Potencia Tip –Up suministran datos que son muy utilizados en bobinas de alto tensión. Estos datos so bien usados para: Comparar materiales y procesos, como prueba de control de calidad para asegurar el curado y bajo contenido de vacíos.
7. Para la prueba de tensión aplicada se deberá obtener el factor que multiplica a  $(2E + 1000)$  para tener el valor de prueba, esto se obtiene de la curva de variación de la tensión antes de ruptura vs. años de servicio y que es otorgado por el fabricante, es muy necesario tener mucho cuidado en este punto porque podríamos acelerar el deterioro del sistema de aislamiento innecesariamente.

## BIBLIOGRAFÍA

1. METODO DE ELEMENTOS FINITOS EN 2D UTILIZANDO MATABA PARA SOLUCION DE PROBLEMAS DE LA TEORIA ELECTROMAGNETICA Ing. Miguel Delgado León.
2. FUNDAMENTOS DE LA TEORIA ELECTROMAGNETICA Reitz Milford.
3. TEORIA DE CAMPOS ELECTROMAGNETICOS Arturo Talledo.
4. MANUAL DE ELECTRICIDAD PARA INGENIEROS Donald G. Fink.
5. ENERGY & INDUSTRIAL SYSTEMS CENTER Mitsubishi Electric Corporation.
6. ELECTRICAL INSULATION MATERIALS Krempel.
7. IEEE TRANSACTIONS ON ELECTRICAL INSULATED. Computer Calculations of Electrical Fields. T. Kouno.
8. MAQUINAS ELECTRICAS A.V. Ivanov Smolenski.
9. CORONA PROTECCION FOR HIGH VOLTAGE STATOR WINDINGS Dr. R.F. Weddleton, C.N. Brown and C.R. Shields NATIONAL ELECTRIC COIL.

10. GUIA RECOMENDADA PARA PRUEBA DE RESISTENCIA DE AISLAMIENTO EN MAQUINAS ROTATIVAS. Norma IEEE – 43.
11. TEST RECORD FOR 24,000 KVA AC GENERATOR. MITSUBISHI ELECTRIC CORPORATION.
12. ENSAYO DE AISLAMIENTO EN GRANDES MAQUINAS ROTATIVAS DE CORRIENTE ALTERNA. Norma IEEE 95 IEEE 433.
13. GUIA RECOMENDADA PARA PRUEBA DE RESISTENCIA DE AISLAMIENTO EN MAQUINAS ROTATIVAS. Norma IEEE- 43.
14. CONSTANTE DIELECTRICA Y FACTOR DE DISIPACION. Normas ASTM D669, D2149.
15. SUMMARY OF PROPERTIES Dupont High Performance Films.
16. SISTEMA INTERCONECTADO LINEAS DE ALTA TENSION Coes.