

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA**



**“CONTROL DE LOS GRADIENTES DE POTENCIAL Y LOS  
EFECTOS DE TEMPERATURA PARA EL DISEÑO DE  
AISLAMIENTO DE LAS BOBINAS EN LAS MÁQUINAS  
ROTATIVAS DE ALTA TENSIÓN”**

**TESIS**

**PARA OPTAR EL TITULO PROFESIONAL DE:**

**INGENIERO ELECTRICISTA**

**PRESENTADO POR:**

**CARLOS RAÚL NORIEGA DEL AGUILA ACOSTA**

**PROMOCIÓN**

**1983 - II**

**LIMA – PERÚ**

**2003**

## SUMARIO

El principal constituyente de las bobinas de las máquinas rotativas de alta tensión, es el aislamiento, y la duración del aislamiento, está directamente relacionada con los esfuerzos impuestos por los campos eléctricos que se establecen en su complicada configuración.

Desde el punto de vista del diseño de las bobinas, para controlar dichos niveles de campo eléctrico, es necesario identificar las configuraciones capacitivas en las que éstos se producen y de qué manera las características de estas configuraciones, determinan un determinado nivel de campo eléctrico, bajo las condiciones de explotación y pruebas del aislamiento de acuerdo a las normas.

Para el estudio se han identificado las configuraciones capacitivas de las bobinas, en las zonas de ranura y en las cabezas de bobina; luego se establecen los niveles de campo eléctrico en el aislamiento de los lados y en los bordes de la parte activa, identificando al radio de los cantos del conductor como el parámetro de influencia responsable del establecimiento del nivel de esfuerzo de campo eléctrico máximo en los bordes del paquete de conductores y se comprueba en forma experimental los niveles de la tensión de ruptura del aislamiento según el radio de los cantos de los conductores

Adicionalmente se muestra, como las características dieléctricas de los aislamientos que actualmente se utilizan en la fabricación de las bobinas de las máquinas rotativas de Alta tensión, son afectadas por la temperatura y por el nivel del campo eléctrico combinados.

Respecto a los gradientes de potencial superficiales, se efectúa el planteamiento teórico en que se basa el control de dichos gradientes, y se muestra el resultado experimental de la aplicación de las superficies de reparto, a la salida de las ranuras.

Como una referencia respecto de la cultura técnica que gobierna este aspecto de la electrotecnia, se ha incluido, un recuento de las principales normas de aplicación de la materia.

## CONTENIDO

	<b>pag.</b>
<b>PRÓLOGO .</b>	1
<b>CAPÍTULO I. -CONSTITUYENTES DE LOS SISTEMAS DE AISLAMIENTO DE LAS MÁQUINAS DE ALTA TENSIÓN Y TEORÍA BÁSICA.</b>	
1.1. Introducción	7
1.2. Conductores	7
1.3. Dieléctricos	9
1.4. Modelo eléctrico del aislamiento	16
1.5. El sostenimiento dieléctrico.	17
1.6. Distancia ficticia y coeficiente de utilización de un dispositivo aislante	18
1.7. Esfuerzos dieléctricos en las bobinas de las máquinas rotativas	20
1.8. Esfuerzos en el aislamiento del bobinado de una máquina rotativa frente al impulso de tensión	21
1.9. Nivel de sostenimiento al impulso del bobinado de una máquina	22
1.10. El índice de temperatura	27
1.11. La capacidad	28
1.12. Determinación gráfica de los campos electrostáticos	35
1.13. Determinación experimental de los campos electrostáticos	36

## **CAPÍTULO II. -CONFIGURACIONES CAPACITIVAS EN LOS BOBINADOS DE LAS MÁQUINAS ROTATIVAS DE ALTA TENSIÓN.**

2.1. Identificación de las configuraciones capacitivas	37
2.2. Configuraciones capacitivas en las zonas de ranura	40
2.3. Configuraciones capacitivas en la zona de los finales de bobina	43
2.4. Configuración del aislamiento entre espiras	47

## **CAPÍTULO III. –EVALUACIÓN DEL CAMPO ELÉCTRICO EN EL AISLAMIENTO DE LAS BOBINAS EN LA ZONA DE RANURA**

3.1. Introducción	49
3.2. Evaluación de la solución de la Ecuación de Laplace utilizando métodos numéricos con diferencias finitas en la zona del borde de bobina	55
3.3. Evaluación de las curvas equipotenciales en el sector del borde.	59
3.3.1. Comprobación de los resultados obtenidos mediante una transformación conforme de los límites de la zona del borde y mediante el método de elementos finitos.	62
3.4. Evaluación experimental del factor de seguridad en la parte activa de las bobinas de AT con aislamiento de mica- epoxy, de acuerdo al criterio de campo eléctrico en los bordes.	114
3.5. Tratamiento del aislamiento entre espiras	122

**CAPÍTULO IV. -INFLUENCIA DE LA TEMPERATURA EN LOS EFECTOS DEL CAMPO ELÉCTRICO DE ALTA INTENSIDAD EN LOS BORDES DE LAS BOBINAS DE AT, CON AISLAMIENTOS DE MICA-EPOXY.**

4.1. Introducción	132
4.2. Evaluación experimental, resultados, interpretación	137

**CAPÍTULO V. -CONTROL DE LOS GRADIENTES DE POTENCIAL SUPERFICIALES.**

5.1. Introducción	145
5.2. Descargas parciales.	148
5.3. Protección contra el efecto corona en la zona de ranura.	149
5.4. Graduación del gradiente de potencial en la superficie de los lados de bobina a la salida de las ranuras..	155

**CAPÍTULO VI. - REFERENCIA A LOS FACTORES DE DETERIORO Y ENVEJECIMIENTO.**

6.1. Introducción	166
6.2. Factores de deterioro y envejecimiento individuales.	167
6.2.1.El envejecimiento térmico	168
6.2.2.El envejecimiento debido a la tensión aplicada en función del tiempo	170
6.2.3.El deterioro debido a las fuerzas termomecánicas.	173
6.2.4.Envejecimiento debido a las fuerzas electromecánicas	178

6.2.5.El deterioro debido a las influencias medioambientales.	179
6.3. Factores de deterioro y envejecimiento múltiples.	181

**CAPÍTULO VII. - NORMAS DE PRUEBA DEL SISTEMA DE AISLAMIENTO DE LAS BOBINAS DE LAS MÁQUINAS DE CORRIENTE ALTERNA DE A.T.**

7.1. Introducción	183
7.2. Tests para determinar la funcionabilidad de un sistema de aislamiento	185
7.3. Pruebas de comprobación de la suficiencia de un bobinado nuevo en fábrica o en su instalación.	185
7.4. Tests de mantenimiento.	187
7.5. Pruebas para indicar la existencia de debilidad del aislamiento.	189
7.6.Pruebas para dar una indicación de la confiabilidad del estado del aislamiento.	193
7.7.Resumen de la Norma para la medición de la resistencia de aislamiento IEEE 43-2000	195
7.8.Conceptos de la Norma de pruebas con alto potencial con Corriente Continua IEEE Std. 95	205

**CONCLUSIONES** 211

**ANEXO**

Anexo A	224
Anexo B	237

Anexo C	244
<b>TABLA DE SÍMBOLOS</b>	249
<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	252



## PRÓLOGO

En la actualidad, la economía de todos los países esta directamente relacionada con la aplicación de las máquinas rotativas de alta tensión, y gran parte del capital invertido en un determinado proceso productivo puede quedar detenido si se produce la falla del aislamiento eléctrico de las bobinas de estas máquinas. – Es pues debido a esto, que se hace necesario un conocimiento cabal del tema del aislamiento eléctrico, de parte de aquella gran cantidad de personal que está relacionada con este aspecto de la economía, ya sea como fabricantes, consumidores y personal de mantenimiento o de reparaciones.

A despecho de lo que podría parecer, el desarrollo del tema del aislamiento eléctrico, de las bobinas de alta tensión, no tuvo un proceso claro, y es así como con el devenir del desarrollo de las grandes máquinas con tensiones de mas de 21 kV y de las resinas sintéticas, durante los años 1970, tuvieron que efectuarse correcciones en los conceptos en los que se basaba el cálculo de los esfuerzos de campo eléctrico y de los factores de seguridad del aislamiento, lográndose establecer la influencia decisiva que tiene el radio de los bordes del conductor de las bobinas en la duración del aislamiento, al identificarse el tipo de configuración que representaban los bordes de éstas en la parte activa, lo cual se hizo extensivo al diseño de las máquinas de menor tamaño.

El establecimiento de un radio determinado para el conductor de las bobinas de las máquinas rotativas de alta tensión, ha tenido un desarrollo muy cualitativo siendo antiguamente, sólo del dominio práctico, el tratar de redondear los cantos de los conductores sometidos a alta tensión o de los perfiles estructurales puestos a masa, sin un mayor concepto de cuánto significaba, en esfuerzo de campo eléctrico, el uso de un determinado perfil de la sección de los conductores de sección rectangular para bobinas (usados generalmente para aplicaciones en baja y alta tensión); es así, que aún actualmente, la especificación de un determinado radio de bordes, puede ser una simple práctica de un determinado productor de conductor de cobre, de acuerdo a las dimensiones del conductor, o estar sujeto a las posibilidades de fabricación del manufacturador del conductor de cobre y con la calidad del acabado dimensional y superficial con que éste puede ser logrado.

Actualmente, en la fabricación de las bobinas para las máquinas rotativas comunes se aplica este concepto, dentro de las restricciones que permiten las proporciones del diseño de las bobinas, pero para quienes se dedican a la reconstrucción de máquinas rotativas o a la fabricación de bobinas que van a ser usadas como repuesto, éstos temas pueden ser oscuros, pudiendo ocurrir que se confunda la aplicación de un determinado perfil de la sección del cobre, utilizándose indistintamente el conductor para baja tensión, en aplicaciones en los que se requieran del control desde la mesa de diseño, de los esfuerzos que deben permitirse en el aislamiento.

Un segundo aspecto que también salta a la vista en un estudio de esta naturaleza, es el hecho de que en los textos clásicos de diseño de máquinas eléctricas [2], el factor de seguridad del aislamiento en prueba, era calculado tomando en consideración el espesor del aislamiento y sus constituyentes en los estratos del mismo, lo cual puede ser la causa responsable de muchas fallas que han ocurrido en la historia de las reparaciones de las máquinas eléctricas y tal vez en la antigua historia de la fabricación de éstas máquinas, que en su momento no fueron bien explicadas.

Es notorio observar algunas veces, cuando va a ser reemplazado el bobinado de una máquina de tensión respetable (13,8 kV), diseñada originalmente según la práctica antigua, que es exigido que las bobinas nuevas, tengan los conductores de la misma forma y el aislamiento, el mismo espesor. - Al proceder de esta manera no se toma en cuenta que los aislamientos actuales para un mismo nivel de tensión se disponen con espesores menores que con los antiguos, con perfil de los bordes del cobre prácticamente redondo y al disponerlos como antes, comparativamente con la práctica actual, se está imponiendo al aislamiento innecesariamente un alto nivel de campo eléctrico en los bordes del paquete de conductores.

La determinación de la forma del patrón de esfuerzos en la sección del aislamiento de ranura, establece también el requerimiento para el aislamiento de los conductores, al quedar definido el esfuerzo en el aislamiento del conductor en los bordes de las bobinas, del doble o de mayor magnitud inclusive, que el esfuerzo en el aislamiento principal contra masa en las partes laterales (el único que era tomado

en cuenta antiguamente). – Esto conduce al establecimiento de límites de uso para los tipos de aislamiento para el conductor ( fibras, esmaltes, composites de mica), según los niveles de tensión de utilización. – Adicionalmente, el uso del conductor de cobre de sección rectangular con perfiles redondeados, tiene la ventaja de presentar un efecto de bordes más suave de la capacidad entre espiras, lo cual es un aspecto favorable frente a la acción de los esfuerzos de campo eléctrico originados por las componentes longitudinales de las ondas de choque, pero en contraposición, obliga a que la manufactura de las bobinas, tenga en la operación del pre-consolidado de esa primera parte del aislamiento, como una operación básica para garantizar un aislamiento libre de huecos entre conductores, tal que no se presente corona interna.

Con respecto al comportamiento de las resinas epóxicas en función de la temperatura, mas allá de la llamada temperatura umbral que se ubica entre los 110 y 120 °C, se ha determinado que el comportamiento desfavorable de todas las características, llámese  $\tan\delta$ , capacitancia, corriente de dispersión, descargas parciales, son grandemente influenciadas por niveles de campo eléctrico intensos, los cuales en las bobinas se ubican en los bordes del paquete de conductores, en presencia de niveles de tensión grandes, por lo tanto su efecto es menor cuando el diseño contempla el mayor radio de bordes posible para el conductor.

Con referencia al control de los gradientes superficiales, la técnica actual, mediante el uso de materiales conductores en las ranuras, y de materiales con características dependientes del campo eléctrico para la aplicación a la salida de

éstas del núcleo, permite ya el control adecuado de los esfuerzos superficiales para evitar la formación de descargas parciales.

Un aspecto muy importante y que se refiere a la vida de los aislamientos, es el de su expectativa de vida frente a las condiciones de la operación y del mantenimiento. Considerando que la aplicación de la tensión a un aislamiento deviene en una lenta carbonización, y con ello a la pérdida de sus cualidades de rigidez mecánica entre los estratos del aislamiento, la acción de los esfuerzos electrodinámicos, termomecánicos, y térmicos, imponen esfuerzos al aislamiento en proceso de envejecimiento, produciéndole la pérdida de su constitución monolítica en especial en la zona de los bordes del núcleo. - Se ha introducido una referencia basada en las normas existentes, con los conceptos principales respecto a este tema del envejecimiento del aislamiento eléctrico.

Otro aspecto importante, respecto al aseguramiento de la calidad, es la aplicación de la normalización existente que se toma de los países desarrollados, la cual ha sido establecida sobre la base de la experiencia en la utilización de las máquinas eléctricas rotativas y del control de los procesos de manufactura, lo cual en nuestro medio se hace dificultoso, debido a que los equipos necesarios para el control tienen costos elevados vs. un mercado gobernado por consumidores que mayormente no practican una cultura adecuada respecto de las características de calidad exigibles para estos productos. -Este estudio no toca el tema de los modelos de la vida de los aislamientos

Es el deseo del autor, que la síntesis de los tópicos presentados, pueda servir como un concepto global respecto de este tema y en la bibliografía que se presenta, que es solo una pequeña ventana hacia éste amplísimo campo de la ingeniería eléctrica, puedan encontrar el camino hacia una mayor profundización.

Finalmente, deseo expresar mi agradecimiento a todas aquellas personas que de un modo u otro me han apoyado o proveído con información rebuscada, con materiales para pruebas y en especial a mi centro de trabajo AEI SRL, donde he podido realizar los ensayos necesarios para el logro de este trabajo.

**CAPÍTULO I**

**CONSTITUYENTES DE LOS SISTEMAS DE AISLAMIENTO DE  
LOS BOBINADOS DE LAS MÁQUINAS ROTATIVAS DE ALTA  
TENSIÓN Y TEORÍA BÁSICA.**

**1.1. - Introducción.-** En la construcción de las bobinas de las máquinas rotativas de alta tensión se utiliza materiales conductores, semiconductores y dieléctricos, los cuales se mencionan a continuación, vistos en lo que concierne a los sistemas de aislamiento de las máquinas de la alta tensión.

**1.2. - Conductores.** - Los conductores metálicos que intervienen en la configuración del sistema de aislamiento de las máquinas de alta tensión son el acero al silicio constituyendo el núcleo ranurado de los estatores y el cobre con el que se construyen las bobinas.

**1.2.1. - Los conductores de las bobinas.** -En las máquinas eléctricas de alta tensión, las espiras de las bobinas están fabricadas con conductor metálico, generalmente con alambre de cobre electrolítico de sección rectangular con bordes redondeados [52], o con secciones de perfiles especiales e interior hueco como las que se usan en las barras roebel de las grandes máquinas.

**1.2.2. - El núcleo magnético.** - En las máquinas eléctricas está constituido de un paquete de láminas aisladas de acero al silicio, troqueladas para formar el

entrehierro y los canales donde se alojaran las bobinas y van montadas sobre un soporte o armazón metálico el cual debe ser puesto a tierra.- Eléctricamente el núcleo es un elemento conductor de tipo metálico del cual los conductores de las bobinas deberán ser aisladas.

La característica de los dos conductores mencionados, que es origen de las expansiones y contracciones diferenciales, es el coeficiente de dilatación térmica.

<b>Característica</b>	<b>Cobre Recocido puro</b>	<b>Acero al Silicio</b>
Resistividad $\rho$ . $\Omega\text{mm}^2/\text{m}$	0,01754	0,27 ... 0,67
Coeficiente de expansión térmica $\text{C}^{-1}$	$16,4 \times 10^{-6}$	$12 \times 10^{-6}$

**Tabla No 1.1. - Características del cobre y del acero al silicio.**

**1.2.3. - Materiales conductores compuestos, con característica lineal para la uniformización del potencial de masa de la superficie de las bobinas y de ajuste del montaje, en la zona de ranura.-** Para tensiones mayores de 4200 voltios generalmente, (obligatorio de 6000 voltios para arriba) [7] en la parte exterior del aislamiento a base de mica, en la zona de ranura, se aplica un recubrimiento exterior conductor (o semiconductor según el léxico) de cierta resistencia, del orden de los 1000 a 5.000 ohmios/ $\square$  (léase ohmios por cuadrado de superficie) [7] para uniformizar el nivel del potencial de masa en la superficie exterior de las bobinas en los puntos donde el aislamiento de la bobina no esté firmemente en contacto con las paredes metálicas de las ranuras.



Los materiales conductores que se utilizan para este fin no son de tipo metálico, ya que es necesario que tengan una resistencia relativamente alta para que no se produzcan corrientes de Foucault al comportarse a manera de puente entre las láminas aisladas del núcleo magnético laminado, en las ranuras de los estatores, pero que sí provean un camino para el drenaje hacia la masa de la corriente que fluye a través del aislamiento en aquellas partes de los lados de las bobinas que no queden en íntimo contacto con el núcleo.

**1.2.4. - Materiales Conductores no lineales (Semiconductores), para la graduación del potencial.** - La brusca subida del potencial en la superficie exterior del aislamiento de las bobinas, a la salida de las ranuras de la parte recta (parte activa) se evita actualmente mediante la aplicación en esa zona, de una capa superficial a base de carburo de silicio con resistencia no lineal, dependiente del campo eléctrico [10]

**1.3. -Dieléctricos.** - Un dieléctrico, es una sustancia en la cual los electrones están tan fuertemente ligados a los átomos, de tal forma que no es posible separarlos mediante la aplicación de un campo eléctrico ordinario.- La aplicación de un campo eléctrico a un dieléctrico, no da por resultado la migración de cargas en el material, produciéndose en cambio, fenómenos de polarización de los átomos y de las moléculas. -Esta propiedad hace del dieléctrico un buen aislador.- La mica, el vidrio y ciertos plásticos son usados como dieléctricos en los sistemas de aislamiento de las máquinas rotativas de AT. - Una característica importante de un dieléctrico, es su permitividad  $\epsilon$ , ésta característica en los dieléctricos, siempre tiene un valor mayor

que la permitividad del vacío o del aire, y a menudo se usa la permitividad relativa  $\epsilon_r$ , esto es, la relación entre su permitividad y la del vacío:

$$\epsilon_r = \frac{\epsilon}{\epsilon_0} \quad \text{Ec. 1.1}$$

Donde  $\epsilon_r$  = permitividad relativa del dieléctrico ( adimensional)

$\epsilon$  = permitividad del dieléctrico (Farad /metro)

$\epsilon_0$  = Permitividad del vacío igual a  $8,85 \times 10^{-12}$  (Farad /metro)

**1.3.1. -Sustancias aislantes.** - Las sustancias aislantes normalmente están constituidas por materiales dieléctricos e impurezas y pueden clasificarse siguiendo varios conceptos:

- a. - Según su estado de agregación: en el vacío, gases, líquidos y sólidos.
- b. - Según sus características químicas: en orgánicas e inorgánicas.
- c. - Según su estructura: En *isótropas* y *anisótropas*, observándose que la rigidez del material depende de la dirección de la aplicación del esfuerzo dieléctrico (en algunas sustancias como el aceite, solo existe un ángulo de orientación)

En las bobinas de las máquinas de alta tensión, la estructura del aislamiento constituye un aspecto de primera importancia.- Los aislamientos tal como actualmente se fabrican son cuerpos estratificados y han sufrido un largo proceso de desarrollo debiendo aquí observarse principalmente dos conceptos con el objeto de controlar un proceso de fabricación:

- La tecnología de fabricación de estos materiales en lo que a la estratificación se refiere
- El resultado, estructuralmente hablando de la aplicación de estos materiales en referencia a la uniformidad de la "densidad" del cuerpo aislante logrado

en el contorno de cualquier sección en corte transversal, especialmente en la parte de los bordes en la zona de ranura, en la zona de los codos entre la parte recta y los extremos de bobina, donde esto es muy crítico.

**1.3.2. - Los aislamientos micáceos.** - Desde que se han usado los sistemas de aislamiento para las bobinas de los estatores de las máquinas eléctricas rotativas, éstos han estado basados en:

- Escamas o laminillas de mica (constituyendo el alma del aislamiento),
- Un agente de pegado como el aglomerante para unir las laminitas (goma laca, brea, resinas de poliéster, resinas epóxicas y siliconas) y
- Un material de soporte (algodón, seda, papel, tejidos de vidrio, tejidos no tejidos y filmes de poliéster).

Las cintas o telas usadas actualmente para el aislamiento de las bobinas de alta tensión están normalmente constituidas con *papel de mica*, tela de *vidrio* o tejidos de *poliéster* como material de soporte y tipos de *resina epóxica* o de *poliéster modificado* como aglutinante.

En función del contenido de mica, serán los valores de la  $\tan\delta$  a temperaturas de operación y por lo tanto la duración del aislante frente a la tensión aplicada.- El aglutinante (pegamento) y el material de soporte proveen la resistencia mecánica y caracterizan la  $\tan\delta$ .

Es muy importante el contenido de mica en toda la estructura del aislamiento logrado, especialmente en las zonas de bordes y codos donde puede producirse concentración de resina.- Para enfocar mejor este aspecto presentemos el resultado del desarrollo que reportó un fabricante europeo (AEG) de cintas Resin Rich: [ 8 ]

Material tipo	Contenido de mica	Campo eléctrico promedio kV/mm	Temp. °C	Tg $\delta$ %	Prueba de duración (horas hasta la falla) a 155 °C	
					Peor bobina	Mejor bobina
A	46%	7.5	155	14	El 30% a las 10 horas	5000 horas con 7,5 kV/mm
B	50%	7.5	155	4	> 7 000 horas	Todas pasan . con 7,5 kV/mm
C	58%	9.3	160	2.5	>>>10 000 horas	Todas pasan con 9,3 kV/mm

**Tabla 1.2. – Influencia del contenido de mica de un material resin rich, en la tang  $\delta$  y en la duración del aislamiento.**

El considerable mayor tiempo antes de la rotura, con el material 2 de la tabla 1.2, es el resultado de los menores valores de tang $\delta$ . - El mayor contenido de mica contribuye a este hecho. - Para obtener una buena duración frente a la tensión aplicada, a temperatura de operación, es esencial tener un alto contenido de mica, tanto como un bajo valor de tang $\delta$ , el cual debe ser menor que 0,1 (10 %). - Si este valor es de 0,1 o más a 155 °C, cualquier incremento en el esfuerzo de campo, causará el sobrecalentamiento del aislamiento, envejecimiento y fallas en un corto tiempo. –Obsérvese en la tabla 1.2, que al presentar estas comparaciones, el fabricante del aislamiento no especificó el valor de la relación entre los campos eléctricos máximo en los bordes de los especímenes de las pruebas y el campo eléctrico promedio en los laterales (algunas veces hacen mención al radio de bordes)

1	Resina, Porcentaje por peso	30~35%
	Contenido de mica por peso	61% aprox.
	Material de soporte	10 %
2	Clase térmica	Clase F / 155 °C
3	Sostenimiento dieléctrico: Prueba de corta duración a 500 volt/seg. de incremento	34 kV./mm
4	Factor de disipación $\tan\delta$ a: 20 °C 100 °C 150 °C	De 1 a 6 kV/mm < 0,01 0,025 ~0,035 0,06~0,08
5	Constante dieléctrica a 1 KHz entre 23 °C y 150 °C	4,5 ~ 5,3

**Tabla No. 1.3. - Propiedades físicas típicas de las cintas de mica resin rich.**

por lo que la repetición de esos resultados no es directa (Ver Anexo). - El análisis de este aspecto es la parte central de este trabajo y se muestra en el capítulo III.

**1.3.3. - El aire.** – El aire es el más importante y el material en estado gaseoso más frecuentemente empleado como aislante. -La constante dieléctrica o permitividad relativa del aire respecto a la del vacío, varia muy poco del valor de 1 y es igual a 1,000590 . - Tal como se sabe, la forma de los electrodos determina la intensidad del campo eléctrico en el aislante que se encuentre entre ellos cumpliendo la función de

<b>Cintas de mica sin impregnar. -Sistema pobre en resina Clase F (resin-poor)</b>		
1	Espesor nominal	0,191 mm
<b>Composición</b>		
2	a	Papel de mica: 100~120 gr./ m <sup>2</sup>
	b	Tela de vidrio 28 gr. / m <sup>2</sup>
	c	Poliéster no tejido ( fieltro) 0,038 mm
	d	Resina epoxica 33 gr. / m <sup>2</sup>
3	Clase térmica: Impregnado con resina para VPI clase F	155 °C Clase F
<b>Propiedades típicas de un aislamiento samicapor procesado al VPI</b>		
1	Clase térmica con resina VPI de clase F	Clase F 155 °C
2	Coeficiente de expansión lineal	10,5 x 10 <sup>-6</sup>
3	Sostenimiento dieléctrico.- Medido en aceite, con C.A. , muestra de 1 mm de espesor	25 kV / mm

**Tabla No. 1.4. - Propiedades físicas típicas de las cintas de mica resin poor.**

dieléctrico, y por lo tanto determina el nivel y la distribución del esfuerzo dieléctrico. La tensión de perforación del aire con un campo eléctrico aplicado de forma homogénea, es proporcional a la distancia entre electrodos, es decir:  $Up = E_p \cdot a$  , siendo  $a$  , la distancia entre los electrodos en mm .- Adicionalmente, la tensión de perforación, es proporcional a la presión, con lo que para una presión en el aire de  $p$  veces 1 mm.Hg, la tensión de perforación, sera proporcional al producto  $a \cdot p$ , con lo

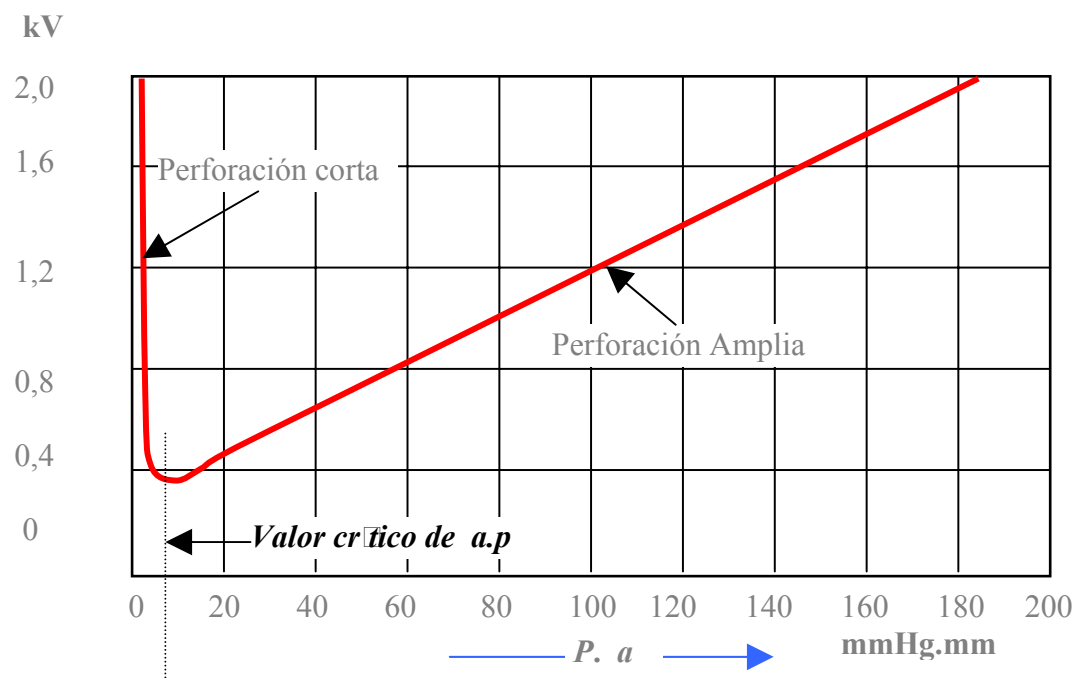


Fig. 1.1 - Característica de la ley de Paschen para distancias cortas [4]

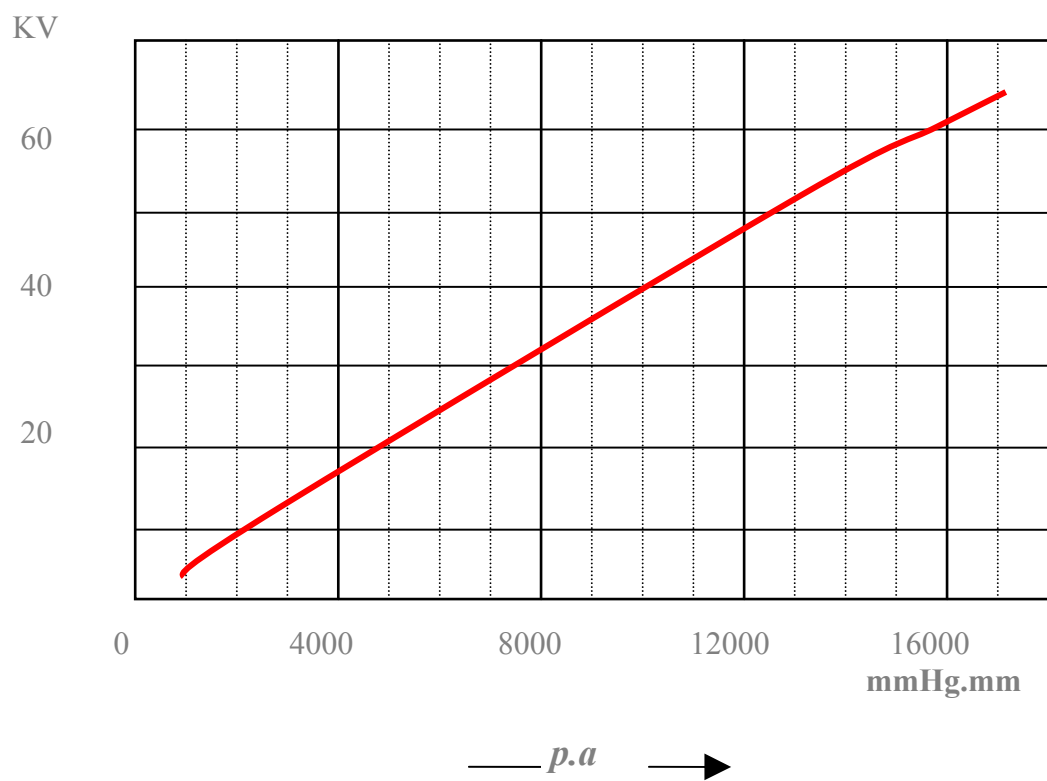


Fig. 1.2 - Característica de la ley de Paschen para distancias grandes [4]

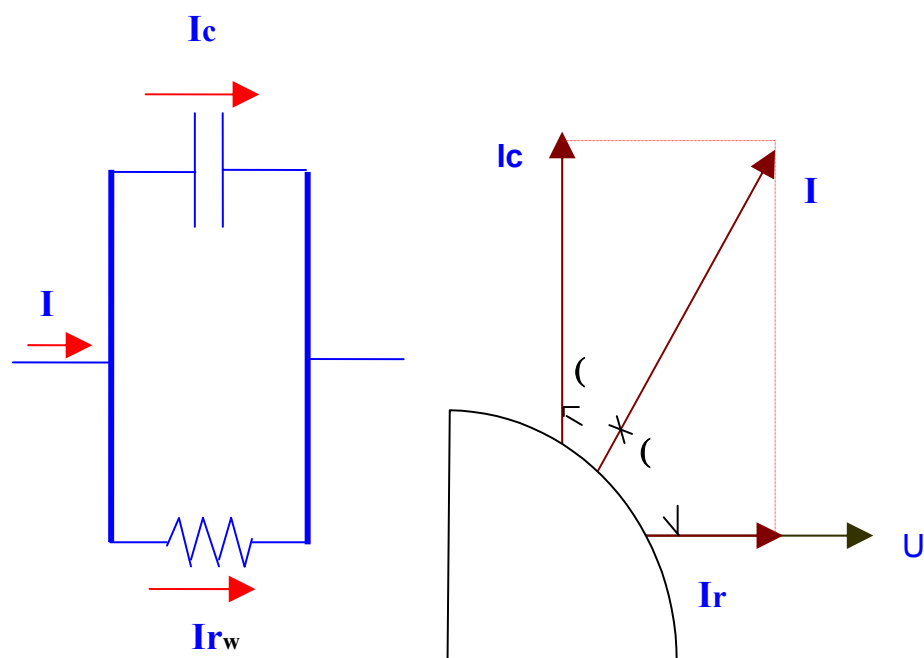
cual se tiene:  $U_p \propto E_p \cdot a \cdot p$ , relación que se conoce como ley de Paschen., la cual para la distancia  $a$ , valen los gráficos de las Figs. 1.1 y 1.2 [4]. - Dichas curvas indican el nivel de tensión para el comienzo de la ionización sin llegar a producirse todavía la descarga de ruptura; con un valor de tensión, ligeramente mayor, se produce la descarga de perforación.

**1.4. - Modelo eléctrico del aislamiento.** - La aplicación práctica del dieléctrico es el aislamiento eléctrico. -Cualquier dieléctrico se puede considerar como equivalente a una combinación de condensadores y resistencias, que reproduzcan su comportamiento tensión corriente según la frecuencia de la tensión aplicada. -En la Fig. 1.3, se representa el circuito equivalente práctico más simple de un dieléctrico.

**1.4.1. -La  $\tan\delta$ .** - El comportamiento de un dieléctrico, sometido a una tensión alterna senoidal de valor eficaz  $U$  y de frecuencia  $f$ , se expresa mediante el diagrama fasorial que se muestra en la Fig. 1.3 donde se define como la  $\tan\delta$ , a la relación entre la componente de corriente  $I_r$  y la componente de corriente  $I_c$  (o sea, la relación de la potencia activa a la potencia reactiva) absorbidas por el material.

Debido a que en los dieléctricos de uso industrial usados como aislamiento eléctrico, el ángulo  $\delta$  suele ser muy pequeño, entonces, la  $\tan\delta$ , (medido por la práctica europea), es casi igual al  $\cos\phi$  o factor de potencia del aislamiento (medidos usualmente por los instrumentos de la práctica norteamericana). -La Norma UNE 20894 IN [36] que es la versión española de la CEI 894:1987 establece un procedimiento para la medición de la tangente del ángulo de pérdidas y de su variación en función de la tensión aplicada (power factor tip-up) de las bobinas y barras para los devanados de las máquinas de más de 5 kV.





$I$  = Corriente total absorbida  
 $I_c$  = Componente capacitiva o devatiada.  
 $I_r$  Componente activa o vatiada de la corriente Absorbida

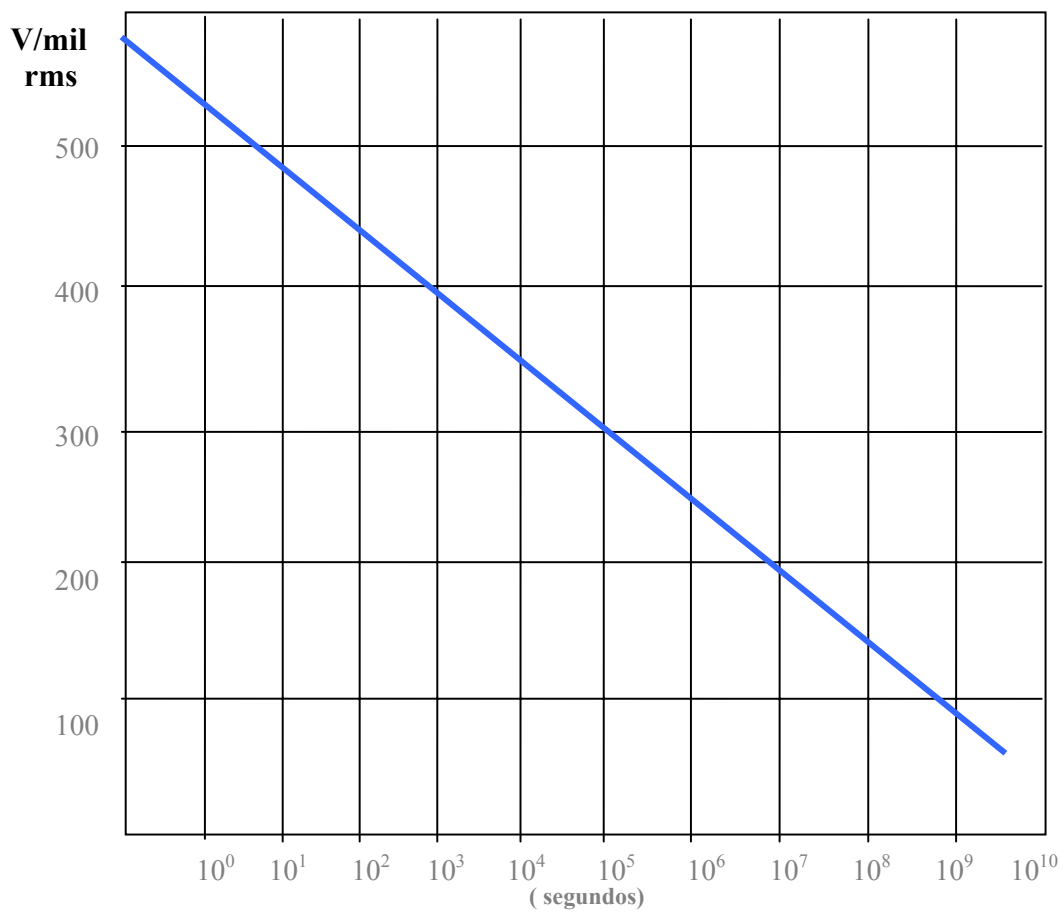
**Fig. 1.3 - Circuito equivalente de un dieléctrico real (aislamiento eléctrico) y su esquema fasorial.**

**1.5. – El sostenimiento dieléctrico [53].** - Se conoce así al máximo nivel de campo eléctrico que puede aplicarse a un dieléctrico sin que se produzca la ruptura eléctrica o térmica del material. - El sostenimiento dieléctrico depende del tiempo de aplicación de la tensión, por ejemplo, a frecuencia industrial o al impulso.

Considerando que el paso de la corriente por un material dieléctrico micáceo produce calentamiento, y por lo tanto una lenta carbonización del aglomerante e inclusive del material de soporte, entonces el sostenimiento dieléctrico naturalmente depende del tiempo de aplicación de la tensión.- En la figura 1.4 se copia una curva típica de la duración frente a la tensión aplicada de los materiales aislantes tipo mica-Mat. para bobinas de A.T. muy usados en la práctica americana y que se muestra en la norma IEEE Std.792, [23] y en otros documentos técnicos.

La rigidez dieléctrica ( $E_p$ ) se refiere a la magnitud del campo eléctrico con el cual ocurre la perforación de una muestra uniforme de dieléctrico de espesor determinado, bajo las condiciones prescritas en la norma que se utilice para su determinación; es decir con el tipo de electrodos prescrito, velocidad de incremento de tensión o escalones de tensión, temperatura, frecuencia, forma de la onda de tensión, el medio en el que efectúa el ensayo del espécimen ( al aire, en aceite) forma estadística de interpretar los resultados etc [53] . – La rigidez dieléctrica de un material aislante varía en función inversa de cierta potencia del espesor, (generalmente de  $d^{1/2}$ ) - Es preferible ensayar los materiales aislantes, en la misma forma en que van a ser utilizados, con el mismo perfil de electrodos, con especímenes tal como serán producidas las bobinas o con muestras representativas, con la misma tensión y temperatura de servicio con la que van a ser probadas y utilizadas, y también determinar el comienzo de la perforación en lugar de la tensión con que se produce la ruptura, lo cual se determina observando, al incrementar la tensión, para qué valor, el incremento de la corriente de fuga , de la  $\tan\delta$  , capacitancia, descargas parciales internas; deja de producirse una relación lineal, de esta forma se consideraran la influencia de las imperfecciones propias de un determinado material y proceso, o la presencia de una anormal distribución de gradientes de potencial, con diferentes valores de la permitividad en los diferentes estratos en función de la tensión y la temperatura, que puedan producir o conducir a ionización interna etc, para que el diseño siempre se sitúe lejos de ese punto en condiciones de operación normal e inclusive de prueba o transitorios.

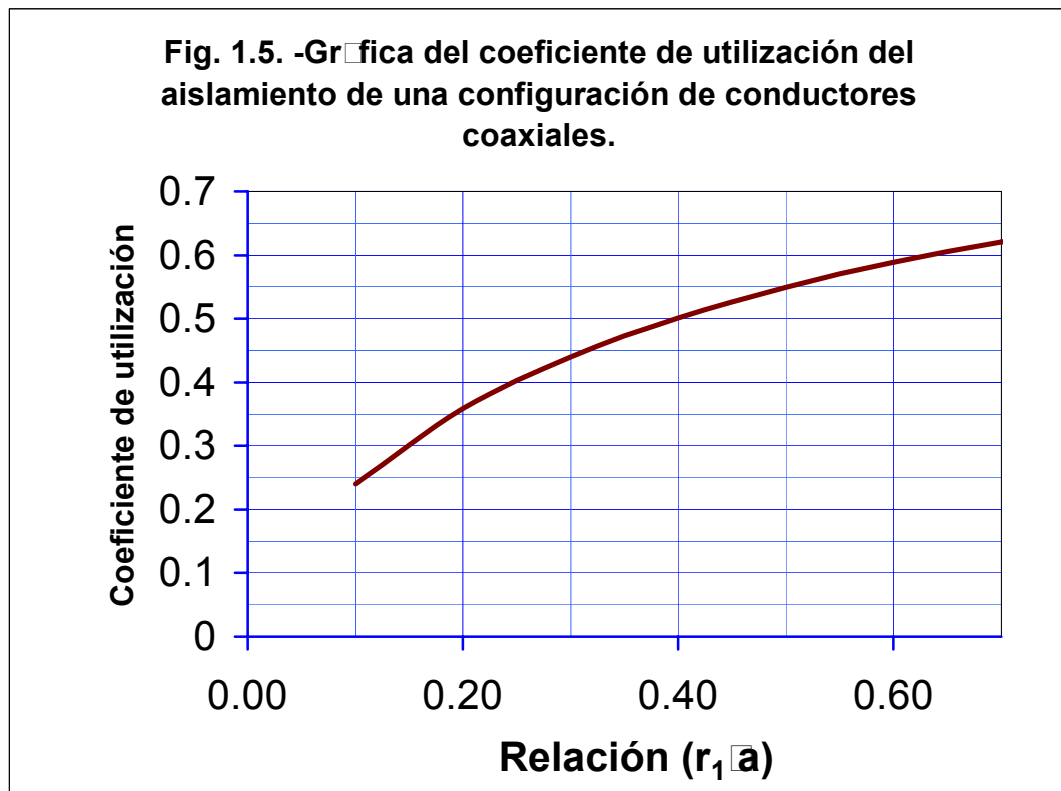
**1.6. –Distancia ficticia y coeficiente de utilización de un dispositivo aislante. -** La tensión de perforación  $U_p$  y la rigidez dieléctrica  $E_p$  del material, de la configuración



**Fig.1.4. -Curva típica de la duración Tensión Vs. tiempo de los aislamientos micáceos para bobinas de Alta Tensión AC. [23]**  
 de un dispositivo aislante, están relacionadas mediante las ecuaciones siguientes [4]:

$$U_p = E_p \cdot \alpha \quad \text{Ec. 1.2}$$

$$U_p = E_p \cdot a \cdot \eta \quad \text{Ec. 1.3}$$



Donde  $E_p$  es la rigidez dieléctrica del material para el espesor  $a$ ;  $\alpha$  es la distancia ficticia, llamada así por Schwaiger,  $a$  es la separación real entre los electrodos y  $\eta$  es el coeficiente de utilización. – El coeficiente de utilización es el factor que nos indica cuán adecuada es la configuración es un dispositivo aislante; es decir que tan bien o cuan desfavorable es una configuración debido a la forma de los electrodos y a las concentraciones de campo eléctrico que se producen en el dieléctrico. - Para una configuración coaxial con el eje común [4] se tiene:  $U_p = E_p \cdot r_1 \cdot \ln(r_2/r_1)$ . tal como se muestra en la Ec. 1.15. - Donde  $\alpha = r_1 \cdot \ln(r_2/r_1)$  y por lo tanto, el coeficiente de utilización para esta configuración es  $\eta = \alpha/a = (r_1/a) \cdot \ln(r_2/r_1)$ . Cuanto menor es el coeficiente de utilización, peor es el diseño de una configuración, ya que significa una alta concentración de campo eléctrico en algún borde o punta, respecto del campo eléctrico uniforme. - En la figura 1.5 se muestra la característica del

coeficiente de utilización del aislamiento de un dispositivo en forma de una línea coaxial, en función de la relación del radio del conductor interior  $r_1$  entre el espesor del aislamiento  $a$ .

### **1.7. -Esfuerzos dieléctricos en las bobinas de las máquinas eléctricas rotativas.**

El aislamiento de una máquina eléctrica rotativa de corriente alterna esta sujeta durante su explotación a los esfuerzos dieléctricos normales producto de la aplicación de la tensión de frecuencia industrial y de su distribución en el bobinado, pero también a los esfuerzos que pueden surgir como producto de los aumentos de la tensión por encima del nivel de la tensión normal de servicio.- Estos aumentos de tensión o sobretensiones pueden tener varias causas, principalmente son por descargas atmosféricas, o por la operación normal o anormal de los interruptores.

El aislamiento que se dispone en las bobinas de las máquinas eléctricas es de dos clases, en función de los dos tipos de esfuerzos dieléctricos que produce la aplicación de la tensión y de su distribución en el bobinado y además por la forma en que el aislamiento es abordado por las sobretensiones. - Estos dos tipos de aislamiento son, el aislamiento principal contra masa y el aislamiento entre espiras.

Ambos tipos de aislamiento soportan en condiciones normales o anormales, a frecuencia industrial, una determinada distribución de tensiones; y frente a las ondas de impulso (ondas errantes, de sobretensiones de rayo, o de switching), soportan las distribuciones transversal y longitudinal de la tensión de choque.

**1.8. - Esfuerzos en el aislamiento del bobinado de una máquina rotativa, frente al impulso de tensión. [28].** - Cuando ocurre una brusca oscilación de la tensión entre un terminal del bobinado de una máquina y tierra, el conductor de la fase

correspondiente no puede súbitamente adoptar el mismo potencial en todos sus puntos, y por lo tanto, tampoco durante el tiempo de subida del impulso de tensión. - Por ello aparecen dos tipos de tensión en el bobinado:

- La tensión entre el cobre y tierra (tensión transversal) y
- La tensión a lo largo del cobre, o entre espiras (tensión longitudinal)

Mientras la tensión transversal, solicita al aislamiento de pared principal contra tierra, la tensión longitudinal esfuerza al aislamiento entre espiras.- Las componentes de mayor magnitud de ambas clases, normalmente aparecen a la entrada o en la primera bobina del bobinado.

En la práctica, las oscilaciones de tensión pueden ser de varias formas, y pueden tener tiempos de frente de onda tan pequeños como de 0.1  $\mu$ seg.

**1.9. -Nivel de sostenimiento al impulso del bobinado de una máquina. -** El bobinado de una máquina, debe tener un nivel de sostenimiento frente al impulso de acuerdo con el sistema de coordinación del aislamiento. -Los niveles nominales de sostenimiento al impulso de tensión, para tensiones nominales de máquina de 3 a 15 kV se obtienen mediante la aplicación de las fórmulas dadas en las notas 2 y 4 de tabla 1 de la Norma IEC © 34-15 que se copia aquí como la Tabla 1.5. - Esta tabla, da los niveles nominales de sostenimiento al impulso de tensión, para algunas tensiones nominales comunes de máquina, junto con las correspondientes tensiones nominales de sostenimiento a frecuencia industrial (r.m.s) de acuerdo a la IEC 34-1.

**1.9.1. - Los niveles de sostenimiento al impulso contra masa.-** Los valores dados en la columna 2 de la tabla 1.5, se adoptan como una orientación para el impulso de tensión transversal o contra masa, y están basados en la formula  $U_p = 4.U_n + 5 \text{ kV}$  ( $U_n \geq 3 \text{ kV}$ ; donde  $U_n$  es la tensión nominal de la máquina en kV). - Esta tensión

que aparece en la bobina de entrada del devanado (y por ello en la bobina de muestra en un test con bobinas individuales elegidas al azar) es igual al valor pico del impulso de tensión del bobinado completo. - Este valor pico puede ser mas alto que el valor pico de la tensión de la prueba de rutina  $\sqrt{2} \cdot (2U_{N+1})$ , pero generalmente, no mayor que el valor que se llega a aplicar a frecuencia industrial de  $2 \cdot (2U_{N+1})$  kV

La prueba de sostenimiento al impulso del aislamiento principal contra masa o cobre-tierra, se realiza en bobinas de muestra tomadas al azar, (estas no se usaran en una máquina) y es probado de dos maneras:

- Mediante la aplicación de tensión a frecuencia industrial, ó
- Mediante impulsos de tensión.

**1.9.1.1. -A frecuencia industrial.** - Se aplica la tensión de prueba nominal de  $2 \cdot U_{N+1}$  kV durante un minuto, entre los terminales cortocircuitados de la bobina en prueba Vs tierra; entonces, la tensión aplicada es incrementada a la taza de 1 kV/seg hasta  $2 \cdot (2 \cdot U_{N+1})$  kV, e inmediatamente debe ser reducida a una taza de al menos 1 kV/seg hasta cero. - No debe presentarse falla durante la secuencia; considerándose entonces que el aislamiento principal y la protección de efecto corona (graduación o reparto) de salida de la parte activa de bobina, cumplen al menos el requerimiento de la tabla 1.5.

**1.9.1.2. -Mediante pruebas con impulsos de tensión.** -El aislamiento principal de las bobinas de muestra tomadas al azar, es probado aplicando tensión entre los terminales cortocircuitados de la bobina y tierra.- La tensión de prueba es generada por un generador de impulsos, generando impulsos de tensión con un frente de onda de 1,2  $\mu$ seg como se especifica en la IEC 60-1 [29]; se recomienda aplicar 5 impulsos.

<b>Tabla 1 de la norma IEC 34-15</b>			
1	2	3	4
Tensión Nominal	Sostenimiento nominal al voltaje de impulso de rayo (Valor pico) para el aislamiento principal Ver Notas 1 y 2	Sostenimiento nominal al voltaje de impulso de frente empinado (valor pico) para el aislamiento entre espiras. Ver notas 3 y 4	Sostenimiento nominal al voltaje de frecuencia industrial. (r.m.s) de acuerdo a la IEC 34-1
$U_N$ kV	$U_P$ KV	$U_{P'}$ kV	$2U_{N+1}$ KV
3	17	11	7
3,3	18	12	7,6
4	21	14	9,0
6	29	19	13
6,6	31	20	14,2
10	45	29	21
11	49	32	23
13,2	58	38	27,4
13,8	60	39	28,6
15	65	42	31

**NOTAS**

- Los Niveles de la columna 2 están basadas en un impulso de rayo standard que tiene un frente de onda de 1,2  $\mu$ seg y un tiempo hasta la mitad de su valor (tiempo de media cola) de 50  $\mu$ seg. Tal como es especificado en la IEC 60-1
- Los valores en la columna 2 se obtienen mediante la aplicación de la formula  $U_P = 4 U_N + 5$  kV, donde  $U_P$  es el valor pico de la tensión nominal de sostenimiento al impulso de rayo, y  $U_N$  es la tensión nominal
- Los Niveles en la columna 3 están basados en impulso que tenga un frente de onda de 0,2  $\mu$ seg.
- Los niveles de la columna 3 se obtienen mediante la aplicación de la fórmula:  $U_{P'} = 0.65 U_P$ , donde  $U_{P'}$  es el valor pico de la tensión nominal de sostenimiento al impulso oscilatorio de frente empinado.
- Los niveles de voltaje dados en las columnas 2 y 3 han sido estimados como apropiados tomando en consideración las características promedio de las máquinas y las condiciones usuales de operación.  
Los niveles mencionados arriba, por lo tanto, pueden no ser adecuados para condiciones especiales de operación, por ejemplo para arranques interrumpidos, o conexión directa a líneas aéreas, en tales casos los bobinados, deberán ser diseñados para sostener otros niveles de impulsos o ser protegidos en forma apropiada.

**Tabla 1.5. -Niveles Nominales del Aislamiento para las Máquinas rotativas [28]**



**1.9.2. -Los niveles de sostenimiento al impulso entre espiras. -** Especificados en la columna 3 de la tabla 1.5, están basados en la formula  $U_p^{\square}=0.65U_p$ . - Por conveniencia, los valores de la columna 3, han sido adoptados como una referencia.

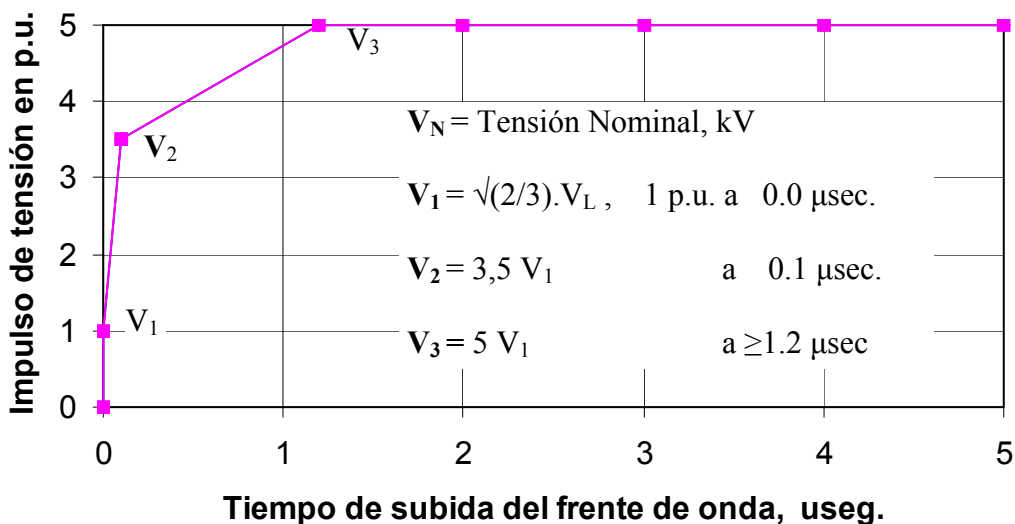
La norma IEC © 34-15 no recomienda que una prueba de impulso de tensión plena sea llevada a cabo en una máquina acabada, o sea en un bobinado montado y acabado, porque en este caso, cualquier falla de aislamiento entre espiras es muy difícil de ubicar con el estado actual del conocimiento.- Los niveles de sostenimiento al impulso, deben ser probados, por lo tanto, sólo indirectamente, mediante pruebas en muestras individuales de bobinas tomadas al azar de un juego de bobinas, pero cuando se efectúen pruebas de rutina en el proceso de un bobinado, estas pruebas de impulso deberían efectuarse en todas las bobinas, con cierto nivel de tensión que esta norma no puede determinar. -Debido a las varias tecnologías de fabricación de bobinas involucradas (resin-rich, VPI, Montaje de bobinas con cabezas no curadas o ‘green coils’) queda a cargo del fabricante el usar valores suficientes para asegurar que las bobinas están libres de defectos después de que éstas han sido insertadas en las ranuras y antes de que sean efectuadas las conexiones entre ellas.

Las pruebas en muestras al random, significa, que son pruebas llevadas a cabo en bobinas que representan adecuadamente la configuración del Ítem acabado a ser usado en la máquina, para el propósito de evaluar el diseño básico, el tipo de materiales, los procedimientos de manufactura, y los procesos incorporados en el sistema de aislamiento. -Los tests de rutina son aquellos llevados a cabo en todas las bobinas de la máquina.

### 1.9.2.1. -Pruebas de control y/o de mantenimiento del aislamiento entre espiras.

El standard IEEE 522 [22] es una guía para la evaluación de la suficiencia del aislamiento entre espiras, de las bobinas preformadas, antes del montaje o para bobinas ya montadas, de la suficiencia para sostener los esfuerzos provenientes de los impulsos de tensión normales, mas no así para evaluar el sostenimiento dieléctrico del aislamiento entre espiras ante disturbios de sobretensiones anormales tales como los causados por descargas cercanas de rayos en líneas sin protección, falsos cierres de interruptores, o mal funcionamiento de diferentes dispositivos de maniobra.

**Fig. 1.6.- Forma de la envolvente del impulso de tensión del sostenimiento eléctrico del aislamiento entre espiras de las bobinas [22]**



Hay dos formas de aplicar las ondas de prueba de impulsos de sobre tensión: [22] en forma inductiva, o en forma conductiva y las formas de onda que se apliquen a las bobinas a probar, deberá estar de acuerdo al tipo de diseño del aislamiento de éstas, siendo la tensión mínima a aplicar de 350 voltios pico entre espiras que es la

tensión mínima de ruptura del aire con un campo uniforme (Fig.1.2), y la forma de onda podrá ser la que se muestra en la Fig. 1.6 [22] para máquinas que estarán sujetas a sobretensiones normales. - Para aquellos casos especiales donde la máquina estará sujeta a sobretensiones altamente anormales el sostenimiento entre espiras, es caso para un acuerdo especial entre el fabricante y el cliente.

Existen en el mercado diversas marcas de fabricantes de los equipos para efectuar estas pruebas siendo uno de los mas populares, los equipos Baker, los cuales tienen toda una filosofía de aplicación en la fabricación como para la recepción de los bobinados de las máquinas y para el mantenimiento en base a la condición del aislamiento o CBM ( un tipo de mantenimiento predictivo)

**1.10. –El Índice de temperatura.-** El índice de temperatura de los materiales aislantes, tal como lo define el standard IEEE Std 1-1979 u otras normas, está relacionado con la temperatura a la cual, el material proveerá una vida especificada como la que es determinada mediante tests o mediante estimaciones de la experiencia de servicio.

**1.10.1. -Clasificación de las temperaturas reconocidas, de los sistemas de aislamiento para equipamiento eléctrico.**

**Sistema de aislamiento de clase A.** - Un sistema de aislamiento de clase A es un sistema de aislamiento que utiliza materiales que tienen preferentemente un índice de temperatura de 105°C, y operando a tal temperatura, incrementa por encima de la temperatura ambiente, lo establecido como lo especifica el standard del equipo, basado en la experiencia o en datos de prueba aceptados. - Este sistema puede

alternativamente contener materiales de cualquier clase, cuidando que, la experiencia, o un procedimiento de prueba reconocido para el equipamiento, haya demostrado una expectativa de vida equivalente. - La temperatura preferida para la clasificación de un sistema de aislamiento de clase A es de 105 °C. -La misma definición se aplica a los sistemas de aislamiento de las clases B, F, H, N, R, S y C , cuyos índices de temperatura se indican en la tabla siguiente.

Clase térmica	Índice de temperatura (°C)
<u>Y</u>	90
A	105
E	120
B	130
F	155
H	180
N	200
R	220
S	240
C	□240

**Tabla 1.6. – Índices de temperatura de los aislamientos**

**1.11. -La capacidad.** -De manera general, se sabe que si se establece una determinada tensión eléctrica entre dos conductores, que tienen cada uno de ellos una determinada forma, los cuales están separados por un material dieléctrico de permitividad  $\epsilon$ , entonces, se establece una determinada corriente hasta que ambos conductores quedan cargados con una carga de Q coulombs, con polaridades opuestas. -El dieléctrico en contraposición, responde polarizándose. A la disposición

de dos conductores separados por un dieléctrico se la conoce como capacitor. -La capacitancia de un capacitor se define pues como la relación que existe entre la carga que puede almacenarse entre sus conductores y la diferencia de potencial aplicada entre éstos. - Físicamente entonces un condensador esta constituido por tres elementos:

- El conductor número uno, con una determinada forma y características.
- El dieléctrico, que puede ser homogéneo o heterogéneo, con constituyentes sólidos, líquidos, gaseosos o el vacío.
- El conductor número dos, que puede tener la misma o una forma y características distintas del conductor número uno.

A continuación se describen las dos principales configuraciones capacitivas que se presentan ( en forma combinada) en las bobinas de alta tensión de las máquinas eléctricas rotativas de A.T. lo cual conceptualmente es tan simple como se muestra, pero físicamente, estas formas capacitivas si bien fácilmente identificables tienen formas tan caprichosas y distribuciones del campo eléctrico sumamente complicadas, donde pueden estar presentes las concentraciones de esfuerzo en las zonas mas vulnerables de las bobinas.

**1.11.1. - Condensador de placas paralelas.** - La configuración del condensador de placas paralelas es muy común, tiene mucho interés para el estudio del comportamiento de las películas de aire remanentes en la estructura del aislamiento de ranura de las bobinas de alta tensión, para el estudio de las tensiones de inicio de las descargas parciales y para el cálculo del reparto de tensiones entre el aislamiento

y las distancias de aire en la zona de las cabezas de bobina. –El esquema de ésta configuración es mostrado en la Fig. 1.7, la cual como se sabe, consiste en dos placas conductoras planas y paralelas de área  $A$ , separadas a una distancia  $d$  entre las cuales se encuentra un medio dieléctrico. –Al aplicar una diferencia de potencial  $V$  entre las placas, si no se toma en cuenta el efecto de los bordes [3], o si el capacitor representa un pequeño sector representativo de un condensador más grande, las líneas de campo eléctrico son líneas rectas dirigidas de la placa cargada con carga positiva hacia la placa cargada con carga negativa, y las equipotenciales están distribuidas en forma lineal, es decir el campo eléctrico es uniforme ( $E_{unif}$ ) lejos de los bordes y su magnitud esta dada por la ecuación:

$$E = E_{unif} = \left( \frac{V}{d} \right) \quad \text{Ec. 1.4}$$

**1.7.1.1. -Capacitor de placas paralelas con dieléctrico estratificado[4].** –En una configuración de capacitores de placas paralelas con aislamientos estratificados se debe considerar que las capas o estratos están dispuestos de tal forma, que las superficies de separación, coinciden con ciertas superficies equipotenciales, entonces las líneas de campo eléctrico serán normales a dichas superficies límites de separación entre estratos. –En el caso general, el condensador de placas planas paralelas con aislante transversalmente estratificado, esta constituido por  $n$  capas de distinto material dieléctrico de permitividad  $\epsilon = \epsilon_0 \cdot \epsilon_r$  ; donde dichas placas, son paralelas a las placas  $P_1$  y  $P_2$  del capacitor. - Cada uno de los estratos, son

considerados como condensadores conectados en serie, cuyas capacidades respectivamente serán:

$$C_i = \epsilon_0 \cdot \epsilon_{ri} \cdot A/d_i \quad \text{Ec. 1.5}$$

Donde  $d_i$  es el espesor del estrato  $i$ . - La capacidad del conjunto esta dada por:

$$C = \epsilon_0 \frac{A}{K} \quad \text{Ec. 1.6}$$

donde  $K$ , tiene la siguiente expresión:

$$K = \frac{d_1}{\epsilon_{r1}} + \frac{d_2}{\epsilon_{r2}} + \dots + \frac{d_n}{\epsilon_{r.n}} \quad \text{Ec. 1.7}$$

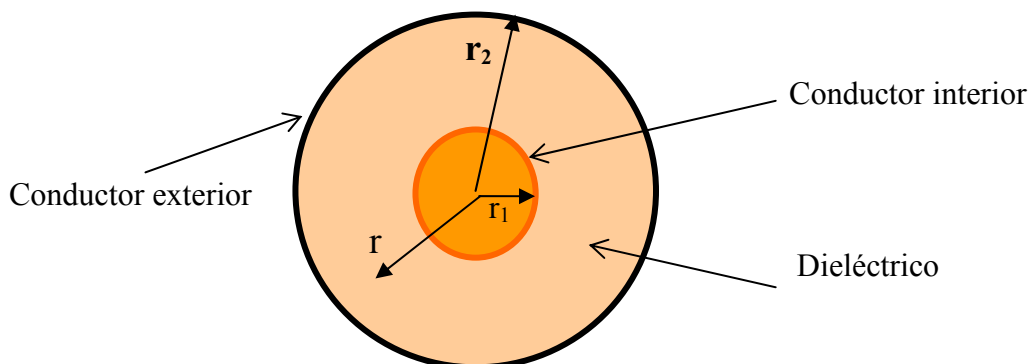
En las expresiones anteriores se expresan:  $C$  en Faradio,  $\epsilon_0$  en Faradio/m,  $A$  en  $m^2$  y el valor de  $K$  es adimensional. -La tensión  $U_n$  en el estrato  $n$  es:

$$U_n = \frac{d_n}{\epsilon_{rn}} \cdot \frac{U}{K} \quad \text{Ec. 1.8}$$

y el campo eléctrico en cada capa será:

$$E_n = \frac{U}{\epsilon_{rn} \cdot K} \quad \text{Ec. 1.9}$$

**1.11.2. – Condensador en línea coaxial.** -Si se aplica una diferencia de potencial entre el conductor interno y el conductor externo en una configuración coaxial, de modo que la carga por unidad de longitud es  $\rho_L$ , se produce un campo eléctrico que queda confinado en el espacio comprendido entre los dos conductores. -Las líneas de campo son radiales, y las equipotenciales son circunferencias concéntricas y su distribución es logarítmica, como se ve en la figura 1.7 -Para conocer el campo eléctrico en un punto, a una distancia  $r$  del eje del conductor central, debe considerarse como en el caso del campo eléctrico de una línea con carga infinita, que



**Fig. No 1.7. - Esquema de la sección transversal de una configuración de conductores coaxiales con radios  $r_1$  y  $r_2$ .**

es conocida como

$$E_r = \frac{\rho_L}{2\pi\epsilon r} \quad \text{Ec. 1.10}$$

No se toma en cuenta la componente axial, y se considera un instante de tiempo dado, en el cual el campo no varía en el tiempo (onda aplicada del tipo TEM) [3]. -

La diferencia de potencial entre los puntos a las distancias radiales  $r_2$  y  $r_1$  ( $r_2 > r_1$ ) de una línea infinita de cargas positivas, es entonces el trabajo por unidad de carga necesario, para transportar una carga de prueba positiva desde  $r_2$  a  $r_1$ . - Este trabajo esta dado por la integral de  $E_r$  entre  $r_2$  y  $r_1$ , siendo el potencial en  $r_1$  mayor que en  $r_2$  por ser positiva la carga, y el campo eléctrico radial dentro del conductor central es cero  $E_r = 0$ , luego el potencial entre los conductores interior y exterior es

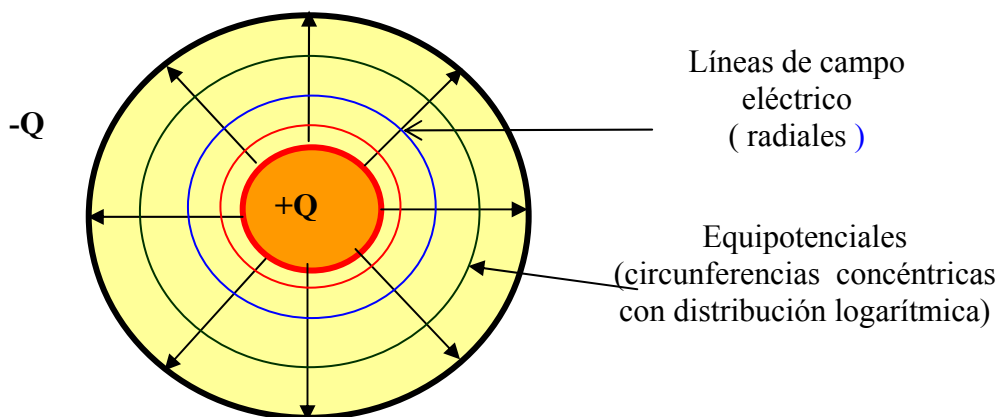
$$V_{21} = -\int_{r_2}^{r_1} E_r \cdot dr = \frac{\rho_L}{2\pi\epsilon} \cdot \text{Ln} \cdot \frac{r_2}{r_1} \quad \text{Ec. 1.11}$$

resumiendo: la diferencia de potencial entre los conductores es:

$$V = \frac{\rho_L}{2\pi\epsilon} \cdot \text{Ln} \cdot \frac{r_2}{r_1} \quad \text{Ec. 1.12}$$



Siendo  $r_2 = r_0 + d$  donde  $d$  es el espesor del dieléctrico y el radio interior  $r_1$  se ha indicado como  $r_0$ .



**Fig. 1.8. - Características de las líneas de campo eléctrico y de las equipotenciales en una distribución capacitiva coaxial.**

La capacidad de la configuración es la carga que la configuración puede almacenar por unidad de diferencia de potencial aplicada, y por unidad de longitud:

$$C_L = \frac{\rho_L}{V} = \frac{\rho_L \cdot \ln \frac{r_0 + d}{r_0}}{2 \cdot \pi \cdot \epsilon \cdot \ln \frac{r_0 + d}{r_0}} = \frac{2 \cdot \pi \cdot \epsilon}{\ln \frac{r_0 + d}{r_0}} \quad \text{Ec. 1.13}$$

Donde  $C_L$  esta dada en Faradio / metro.

En la práctica de la construcción de aislamientos para bobinas o conductores de alta tensión, cuando se trata con esta configuración coaxial, con un conductor interior de radio  $r_0$  y un espesor de aislamiento  $d$ , se consideran tensiones de trabajo nominales  $U_n$ , de prueba  $U_t$ ; y de perforación (o ruptura)  $U_r$ . - Correspondientemente para el campo eléctrico se tendrá un valor nominal  $E_n$ , unos valores, máximo  $E_{\max}$  y mínimo  $E_{\min}$ . para cada condición de tensión aplicada.

El campo eléctrico  $E_r$  en voltios / metro a la distancia  $r$  ( $r=r_0+x$ ) del eje es:

$$E_r = \frac{\rho_L}{2 \cdot \pi \cdot \epsilon \cdot r} = \frac{\frac{2 \cdot \pi \cdot \epsilon}{\text{Ln} \frac{r_0 + d}{r_0}} \cdot V}{2 \cdot \pi \cdot \epsilon \cdot r} = \frac{V}{r \cdot \text{Ln} \frac{r_0 + d}{r_0}} \quad \text{Ec. 1.14}$$

El campo eléctrico en un condensador de placas paralelas es uniforme y tiene el valor de:  $E_{\text{unif}} = V / d$  voltios por metro o por milímetro. -Considerando éstas mismas relaciones, pero en la forma que sigue, se puede visualizar la tensión de perforación  $V_p$  de una configuración coaxial, en función del campo eléctrico de rotura a la distancia  $r_1 = r_0$  del eje de la configuración, justo sobre el conductor interior, donde se produce el campo eléctrico máximo.

$$V_p = E_p \cdot r_1 \cdot \text{Ln} \left( \frac{r_2}{r_1} \right) = E_p \cdot r_0 \cdot \text{Ln} \left( \frac{r_0 + d}{r_0} \right) \quad \text{Ec. 1.15}$$

Las relaciones, del campo eléctrico en función de la posición radial  $E_r$  y la del campo eléctrico máximo junto al conductor interior  $E_M$  en una configuración de electrodos en línea coaxial, entre el campo eléctrico uniforme en el condensador de electrodos planos de igual espesor  $E_{\text{unif}}$ , son respectivamente:

$$\frac{E_r}{E_{\text{unif}}} = \frac{\frac{V}{r \cdot \text{Ln} \frac{r_0 + d}{r_0}}}{\frac{V}{d}} = \frac{d}{r \cdot \text{Ln} \left( \frac{r_0 + d}{r_0} \right)} \quad \text{Ec. 1.16}$$

$$\frac{E_{\text{MAX}}}{E_{\text{unif}}} = \frac{d}{r_0 \cdot \text{Ln} \left( \frac{r_0 + d}{r_0} \right)} \quad \text{Ec. 1.17}$$

Donde se está poniendo  $r_0$  como el radio del conductor interior en vez de  $r_1$ .

La tensión  $V_r$  en un punto situado a una distancia  $r$  en relación con el cilindro interior:

$$V_r = -\int_r^{r_0} E_r dr = -\int_r^{r_0} \frac{V}{\text{Ln} \frac{r_0 + d}{r_0}} \frac{dr}{r} = V \cdot \frac{\text{Ln} \frac{r}{r_0}}{\text{Ln} \frac{r_0 + d}{r_0}} \quad \text{Ec. 1.18}$$

La tensión  $V_r$  en el mismo punto a una distancia  $r$  del eje de la configuración cilíndrica coaxial, pero respecto al cilindro exterior:

$$V_r = -\int_{r_2}^r E_r dr = -\int_{r_2}^r \frac{V}{\text{Ln} \frac{r_2}{r_1}} \frac{dr}{r} = V \cdot \frac{\text{Ln} \frac{r_0 + d}{r}}{\text{Ln} \frac{r_0 + d}{r_0}} \quad \text{Ec. 1.19}$$

Para la configuración de capacitores cilíndricos coaxiales con dieléctrico estratificado y sus características, ver en [1], [2], [3] y [4]

**1.11.3. –Energía almacenada en un capacitor.** -Para cargar un capacitor se necesita efectuar un trabajo. - En términos infinitesimales, el potencial  $V$  es el diferencial de trabajo  $dW$  correspondiente al infinitesimal de carga  $dq$ .

$$V = \frac{dW}{dq} \quad \text{Ec. 1.20}$$

$$W = \frac{1}{C} \int_0^Q q \cdot dq = \frac{1}{2} \frac{Q^2}{C} = \frac{1}{2} \cdot C \cdot V^2 \quad \text{Ec. 1.21}$$

donde  $W$  es la energía en Joules,  $C$  es la capacitancia en Faradios,  $V$  es la diferencia de potencial en voltios y  $q$  es la carga acumulada en cada uno de los conductores.

**1.12. - Determinación gráfica de los campos electrostáticos.** - Cuando las configuraciones de campo eléctrico no puedan ser analizadas de manera sencilla, aun

utilizando la ecuación de Laplace, entonces, en problemas bidimensionales, puede recurrirse al método gráfico, mediante el cual se considera que se obtiene también una solución al problema de encontrar la forma y distribución del campo eléctrico y de las equipotenciales, o se puede también recurrir a los métodos numéricos o a los analógicos. - La capacitancia de un capacitor celular de campo, es igual a la permitividad  $\epsilon$  del medio y la energía almacenada en cualquier celda del mismo tipo es:  $W = \frac{1}{2} C.V = \frac{1}{2} CV^2 = \frac{1}{2} \epsilon V^2$ , por consecuencia, la densidad media de la energía  $w = W/(b.d.l)$ , es inversamente proporcional al área de los extremos de las celdas (de los cuadrados curvilíneos del mapa de campo)

**1.13. - Determinación experimental de los campos electrostáticos** -Todas las relaciones establecidas para el campo eléctrico pueden por analogía aplicarse a los conductores, y es posible determinar las características del campo eléctrico en un medio dieléctrico, efectuando un esquema análogo, donde en vez del medio no conductor, se ubique otro medio conductor y en el cual si se aplica tensión, las densidades de corriente se repartirán como las densidades del campo eléctrico, permaneciendo invariables las superficies de nivel o equipotenciales, que son las que pueden evaluarse por cualquier medio analógico. - El esquema así levantado, también será una solución del problema de valores límites, o sea una solución de la Ec. de Laplace para la configuración propuesta. - Para el caso, existen varios métodos, siendo el más práctico el de la lámina de resistencia.

## **CAPÍTULO II**

### **CONFIGURACIONES CAPACITIVAS EN LOS BOBINADOS**

#### **DE ALTA TENSION**

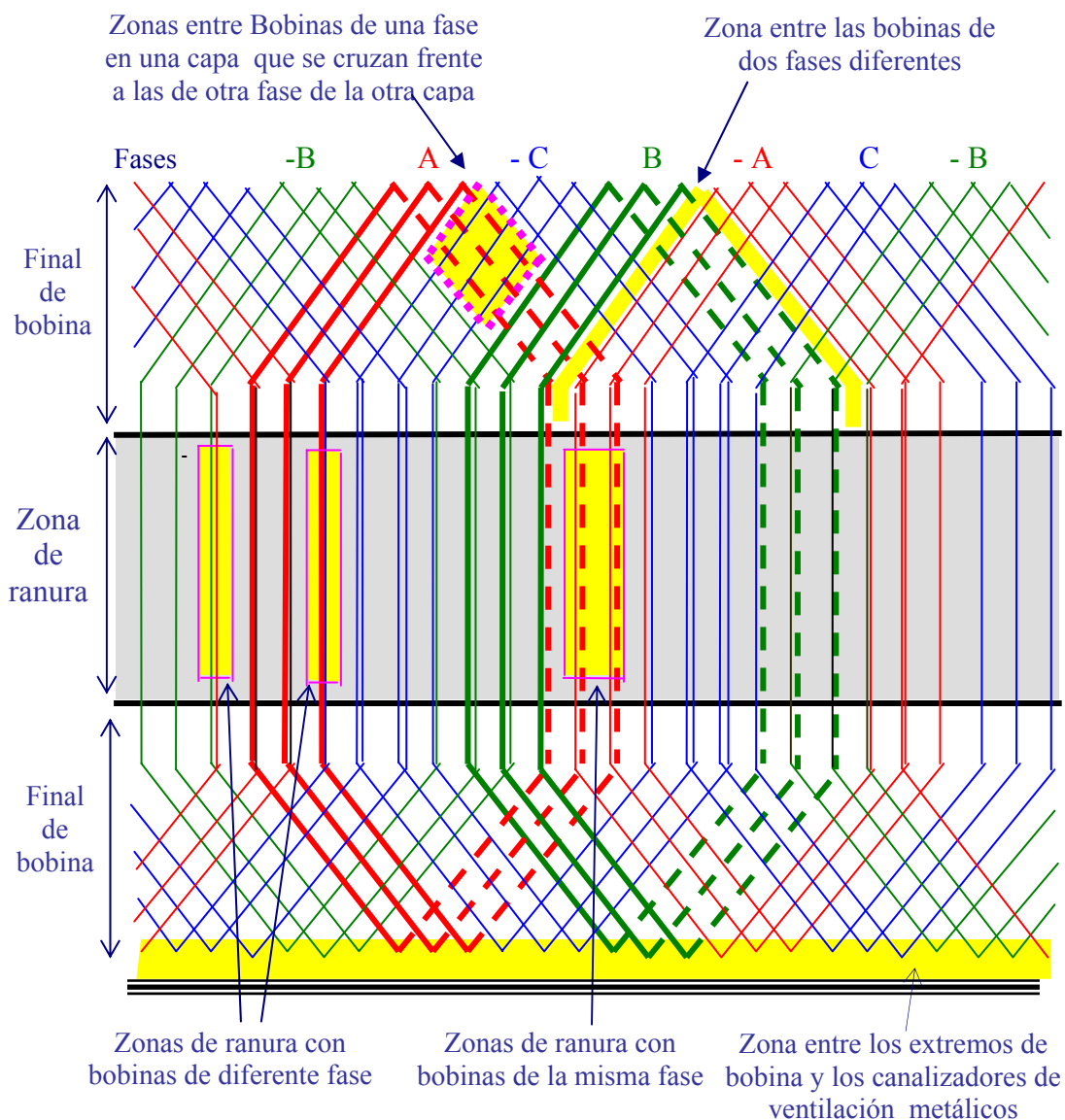
**2.1. –Identificación de las configuraciones capacitivas.** -En los estatores de las máquinas de alta tensión, las bobinas instaladas en el núcleo, forman diferentes configuraciones capacitivas en dos regiones físicamente bien definidas:

- La región de los lados de bobina o de la parte activa ( en la zona del núcleo)
- La región de los finales de bobina o de las cabezas de bobina.

En la región de los lados de bobina, se forma una configuración capacitiva entre el paquete de conductores de la bobina, las paredes metálicas de las ranuras más la superficie conductora de los lados de bobina si la hubiera, y el aislamiento eléctrico, que es el dieléctrico; se formará así para cada fase de la máquina, una componente de capacitancia propia de la fase contra masa. - Esta configuración es la misma en todas las ranuras si las bobinas llevan recubrimiento conductor anticorona, como se recomienda para las máquinas de más de 4,16 kV; Pero en las de menos tensión, en las cuales las bobinas no tienen dicho recubrimiento, en aquellas ranuras donde coincidan los lados de bobinas de diferentes fases, habrá una componente de capacitancia entre fases diferentes.

En la región de las cabezas de bobina se presenta una configuración de capacitancias muy compleja, entre los conductores de cada dos bobinas separadas por sus

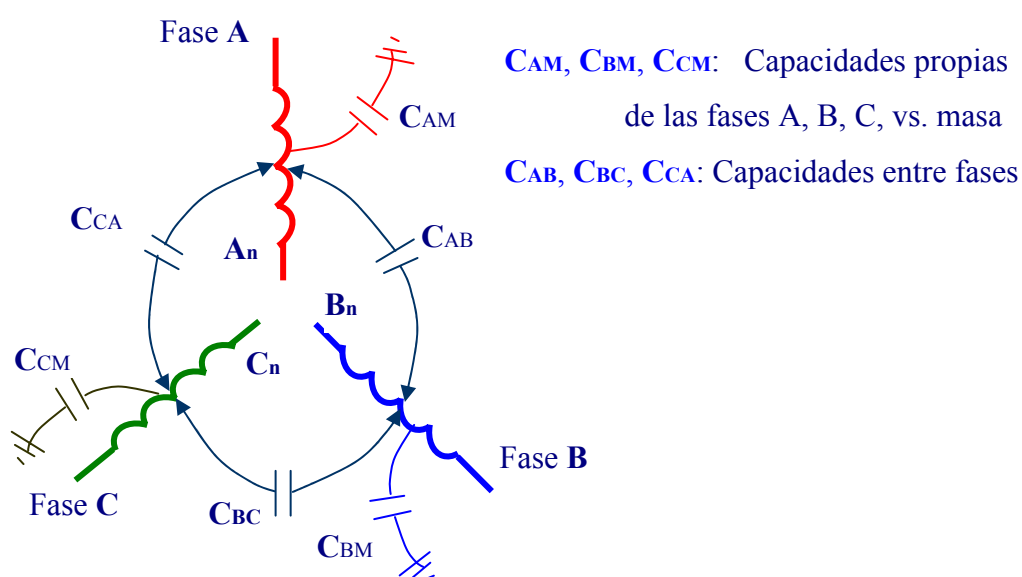
correspondientes distancias de aire o gas, y que estén a diferente potencial; entre los conductores de las bobinas Vs. los componentes puestos a masa ( núcleo, dedos de presión del núcleo, anillos de soporte de las cabezas de bobina, campanas de canalización del flujo de aire si éstas son metálicas). -Pero, para los efectos del estudio de los esfuerzos dieléctricos y sus efectos destructivos que se presentan en funcionamiento normal o en la condición de las pruebas de alto potencial contra



**Fig. 2.1. - Zonas de ranura y de los extremos de bobina en un sector del esquema un bobinado de alta tensión tipo imbricado.**

masa, ya sea de las bobinas en forma individual (durante el proceso de fabricación, aceptación y montaje) o en las pruebas entre fases, interesa tomar en cuenta, sólo las configuraciones capacitivas que se presentan entre bobinas contiguas a potenciales diferentes (la de una fase puesta a alto potencial y la bobina de la fase contigua puesta deliberadamente a masa, para probar el aislamiento entre ellas), o entre bobinas a diferente potencial que se cruzan (por Ej. entre una capa y otra en los bobinados imbricados).

En la Fig. 2.1 se muestran los sectores de la zona de ranura y de los finales de bobinas en una parte del esquema del bobinado del estator de una máquina de alta tensión, el cual tiene tres bobinas por grupo en cada fase, con paso diametral 1-10 y paso de bobina 1-9. - En la Fig. 2.2 se muestra el esquema eléctrico que representa las capacidades propias de las fases y las capacidades entre fases de un bobinado trifásico.



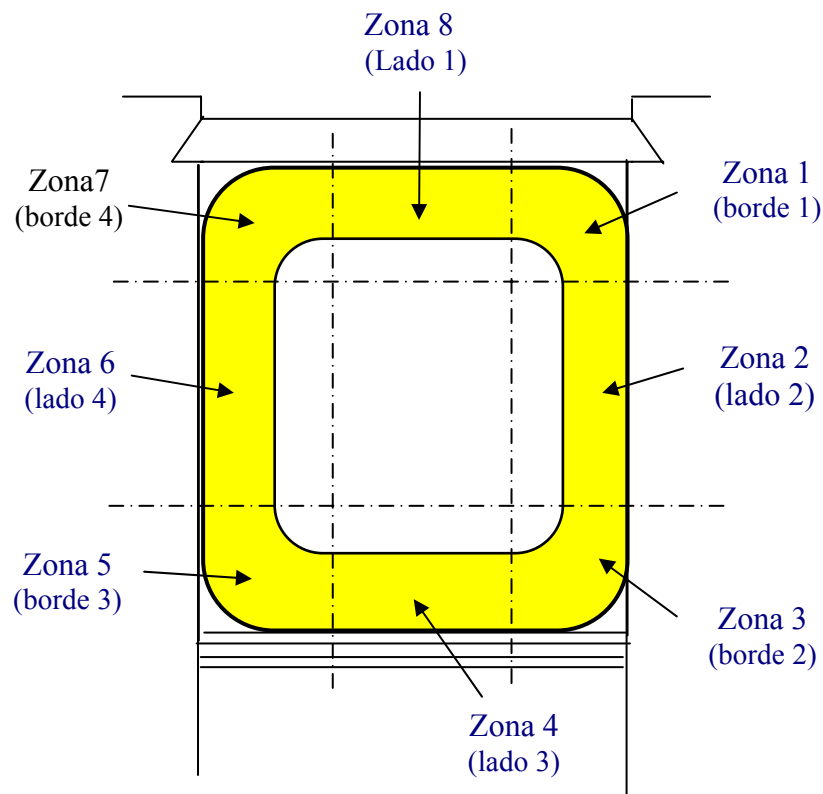
**Fig. 2.2. - Esquema de las capacidades del aislamiento de un bobinado trifásico de Alta tensión.**

Las capacidades propias de cada fase contra masa están compuestas por la capacidad de las bobinas en la parte activa contra masa, más la capacidad de las mismas en la zona de los finales de bobina contra masa (contra el núcleo o contra cualquier pieza metálica puesta a tierra)

Las capacidades mutuas entre bobinas de fases diferentes están compuestas principalmente por la capacidad entre las cabezas de bobina de las bobinas de fases adyacentes, más la capacidad entre las bobinas de diferente fase y capa que se cruzan; ver la Fig 2.1, y en aquellas bobinas de máquinas de 4,16 kV o menos, que no llevan en la parte de ranura una superficie conductora para la puesta a tierra de la superficie exterior de la bobina, hay adicionalmente en la zona de ranura, una componente de la capacidad mutua entre bobinas de fases diferentes, en aquellas ranuras, en las que por el acortamiento del paso de bobina, van alojadas los lados de bobina de diferente fase.

**2.2. - Configuraciones capacitivas en las zonas de ranura.** - En la Fig. 2.1, en la zona correspondiente a las ranuras y en toda la longitud de éstas, se tiene una configuración de los lados de las bobinas cuyo esquema en corte se muestra en la Fig. 2.3. – Dicha figura, muestra en corte la configuración de la bobina y la ranura asimilada al concepto de la capacidad. - En ella, el paquete de los conductores (cuya superficie exterior se muestra idealizada como un solo conductor y no como la de un haz de conductores) representa uno de los conductores del capacitor.- En las bobinas de hasta 4200 voltios, las caras interiores de las ranuras del paquete magnético, representan el otro conductor.- En las bobinas de más de 4200 voltios, se dispone en la superficie exterior de la bobina, un recubrimiento conductor, esta superficie se

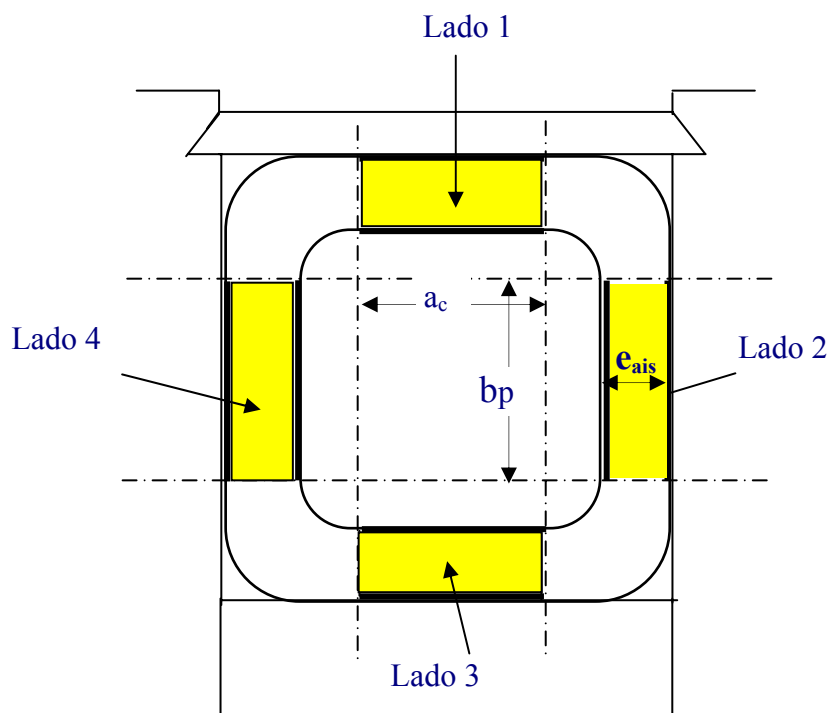




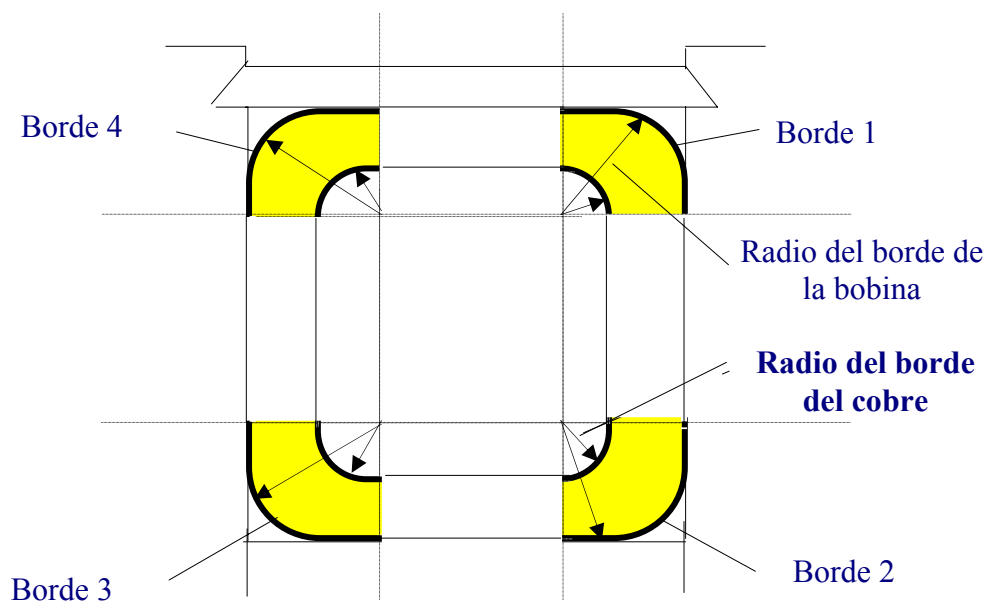
**Fig. 2.3. - Configuraciones capacitivas en una bobina en la zona de ranura**

pone firmemente en contacto con los lados metálicos de la ranura y constituye el otro conductor. - Entre ambos conductores se encuentra el aislamiento a base de mica que es el dieléctrico.

En la Fig. 2.3 se observa en corte, que los sectores del aislamiento de ranura indicados del 1 al 8, representan capacitores dispuestos en paralelo, de los cuales los sectores 2, 4, 6 y 8, que son los lados de la bobina, se pueden considerar como capacitores de placas paralelas, en la figura 2.4, se han resaltado estas zonas.- El concepto del modelo eléctrico ideal de esta configuración se ha resumido en el acápite 1.11. -Los sectores 1, 3, 5, y 7 que se hallan localizados en las cuatro esquinas de la sección de ranura de la bobina, es decir los bordes de las bobinas, son



**Fig. 2.4. -Configuraciones de capacitores de placas paralelas en la sección de ranura de una bobina**



**Fig. 2.5. -Configuración capacitiva en sectores de línea coaxial de los bordes de las bobinas, en el sector de la parte activa**

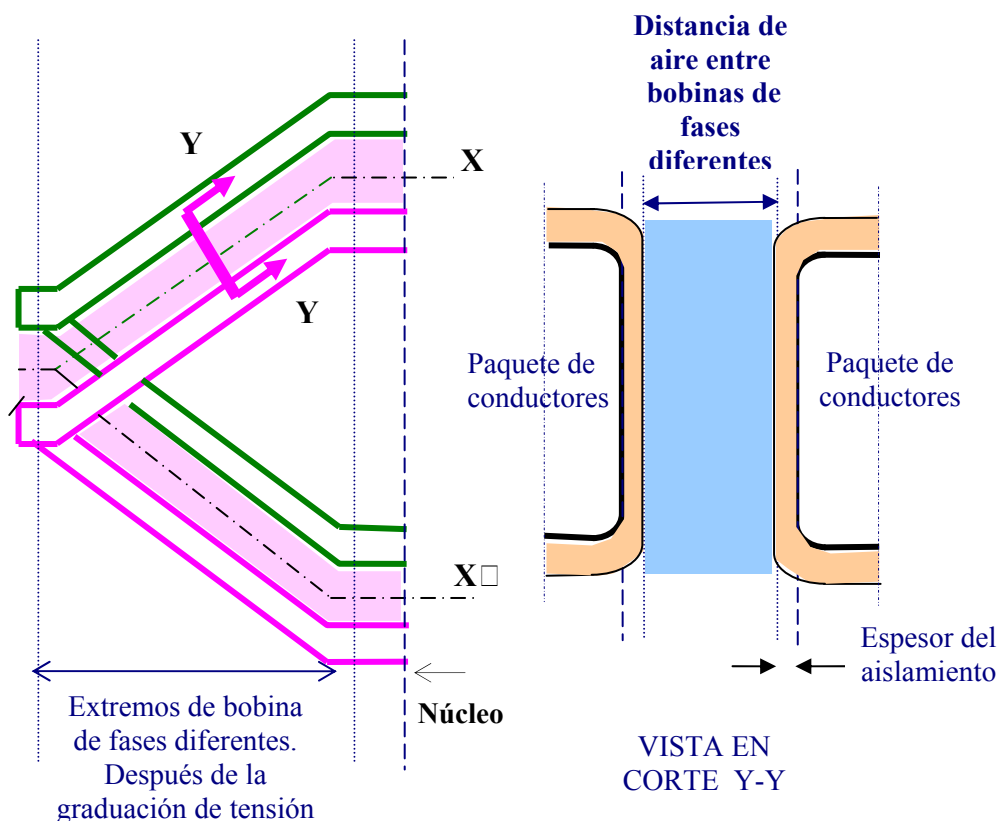
sectores de  $90^\circ$  de una configuración capacitiva de línea de conductores cilíndricos coaxiales, en la figura 2.5 se resaltan estas zonas de los bordes. - En estos sectores se aprecia fundamentalmente:

- El radio del borde (canto) del conductor interior (del cobre):  $r_o$
- El espesor del aislamiento en los bordes :  $d$
- El radio del borde exterior del aislamiento :  $R=d+r_o$

Las características del campo eléctrico y de la distribución del potencial de una configuración capacitiva de conductores cilíndricos coaxiales se ha resumido en el acápite 1.11.2

Las características de la combinación de las dos configuraciones indicadas, de un sector de  $90^\circ$  de línea coaxial con un sector de condensador de placas paralelas se analiza en el Capítulo III.

**2.3. – Configuraciones capacitivas en la zona de los finales de bobina.** -Según el tipo de bobinado, en las cabezas de bobina se presentan múltiples combinaciones de las configuraciones capacitivas a que dan lugar los paquetes de conductores de las diferentes bobinas con los aislamientos, distancias de aire y materiales de fijación (aislantes y cuerpos metálicos de soporte ); pero de todas estas configuraciones las que toman mayor importancia son las que se dan entre las cabezas de bobinas de fases diferentes en aquellos sectores del bobinado donde se presenta la máxima tensión entre bobinas.- En los bobinados imbricados, se busca un arreglo de los grupos de bobinas tal que, entre bobinas contiguas de los grupos de fases diferentes, no se establezca una tensión cercana a la tensión entre líneas, buscándose que trabajen con una diferencia de tensión menor, como la de línea-neutro.



**Fig. 2.6. - Configuraciones capacitivas en las cabezas de bobina (después de la zona de graduación de potencial)**

**2.3.1. – Capacidad entre bobinas contiguas de fases adyacentes.** - Consideremos un bobinado imbricado del cual en la Fig. 2.6 se ha representado los extremos de bobina de dos bobinas contiguas de fases diferentes. -En la vista y-y de dicha figura, se muestra en corte la disposición de los paquetes de conductores de las dos bobinas y los dieléctricos entre ellos. -Tomando para efectos de análisis simplificado solamente el material que se encuentra directamente entre los dos paquetes de conductores de las bobinas contiguas; vemos que se trata de una distribución capacitiva de condensadores planos con dieléctricos en serie, a saber: el aislamiento de la primer bobina, el espacio entre las bobinas con el aire entre ellas y el aislamiento de la segunda bobina.

Según el nivel de tensión de la máquina, y de acuerdo a la práctica de cada fabricante, las distancias entre bobinas de diferente fase, es establecida con el objeto de que en los ensayos, no se produzcan efluvios peligrosos que dañen el recubrimiento de protección del aislamiento de las cabezas de bobina.- El aislamiento de las cabezas de cada bobina se dispone con un espesor neto de entre el 70 y el 100% del espesor del aislamiento de la parte de ranura.

Cuando no se respetan las distancias de aire establecidas, entre las cabezas de bobina de fases diferentes, si bien no se producirá usualmente la falla del aislamiento entre bobinas, pero cuando se efectúe una prueba de tensión aplicada entre fases, a oscuras se observará la formación de un efecto corona intenso. -En servicio, por una falta de conservación de la limpieza de las cabezas de bobina, las distancias de aire pueden reducirse; la contaminación y la humedad producirán la formación de un efecto de puntas por donde se establecerán corrientes de fuga que conducen al tracking (esto es usual en las cabezas de bobina en máquinas cerradas con anillos rozantes interiores, por la acumulación de carbón). -Considérese además que la rigidez del aislamiento de las cabezas de bobina, generalmente es menor que en la parte de ranura, confiándose a las distancias entre bobinas la función principal del aislamiento visto como reparto de tensiones.

En el cuadro No. 2.1 se indica en forma referencial las distancias usuales entre bobinas de fases diferentes y el reparto de tensiones en el aire y en el aislamiento de las cabezas de bobina, al ser aplicada la tensión de prueba entre fases. -En la Sección 1.11.1.1 se presentan las ecuaciones que permiten evaluar el reparto de tensiones en

el aislamiento y en el aire, en esta configuración de capacitores en serie.- La distribución de tensiones se da en relación inversa a sus constantes dieléctricas relativas. - Si por alguna causa la distancia neta de aire entre bobinas de fases diferentes, en alguna parte del bobinado en prueba, por ejemplo para la tensión de 6,6 kV, tuviera un valor de sólo 1 mm entonces el reparto de tensiones en la prueba con 14,2 kV sería de 8,88 kV en el aire y 2,66 y 2,66 kV en ambos aislamientos de las bobinas contiguas, entonces, el factor de seguridad, para la distancia de aire de 1 mm a la presión atmosférica de 760 mm Hg sería teóricamente de 0,6 (para  $p.a=760 \text{ mmHg} \cdot x \text{ mm}$ , Fig. No. 1.1, se tendría una tensión de descarga de 5 kV); con lo que no se podría aplicar la tensión de prueba sin que se presente un fuerte efecto de descargas parciales, las que si bien no producen la falla inmediata del aislamiento (ver el Ap. 5.2.4), rápidamente podrían erosionarlo o envejecerlo en la zona comprometida. - A oscuras aquello se ve como el efecto que produce una lámpara de neón encendida.

**2.3.2. -Capacidad entre bobinas de fases y capas diferentes que se cruzan.-** Esta configuración adquiere importancia sólo a mayores niveles de tensión [14] ya que en las máquinas convencionales generalmente las bobinas se construyen con una curvatura suficiente de tal manera que la capa superior y la inferior están lo suficientemente separadas, tal que resulte que todo el esfuerzo dieléctrico cae en la distancia de aire que está entre ambas capas y muy poco en el aislamiento de la cabeza de bobina, sin embargo debido a la acumulación de contaminación, éstas distancias pueden quedar con un efecto neto empobrecido o distorsionado por la presencia de caminos de descarga polarizados, lo cual explica la ocurrencia de fallas

que son muy comunes en las cabezas de bobina en esta zona cuando el mantenimiento en las máquinas abiertas es deficiente, o en el caso de máquinas cerradas con rotor bobinado , con anillos deslizantes u contactos de carbón de trabajo permanente, lo cual acarrea una gran contaminación interior.

### **2.3.3. –Capacidades entre los finales de bobina y otros elementos de la máquina**

**puestos a masa o a diferente nivel de tensión.** - En estas configuraciones, el esfuerzo principalmente esta aplicado en la distancia de aire que los separa, y dicha distancia normalmente es apreciable para que en ningún caso se produzca en ellas esfuerzos que lleguen a ionizar el aire. - En el caso de los aros metálicos de fijación de las cabezas de bobina, puestos a masa, la configuración es similar a la de una bobina en la ranura, donde los espacios de aire remanentes entre la cabeza de bobina y el aro de soporte, puede quedar ionizado al ser aplicado un determinado nivel de tensión.- En las máquinas de tensiones mayores, esto requiere un adecuado reparto de los esfuerzos y de los dieléctricos [14]

**2.4. - Configuración del aislamiento entre espiras.** - Los bobinados de las máquinas de alta tensión, normalmente son efectuados utilizando bobinas prefabricadas con conductores de sección rectangular, por lo que entre espiras se tendrá siempre una configuración capacitiva de condensadores planos donde también tiene importancia la configuración de los bordes [3]

En las máquinas chicas de AT, en condiciones normales de operación a frecuencia industrial, la tensión que se establece entre espiras es pequeña, del orden de menos de 100 voltios, y para este nivel de tensión de operación, sólo sería necesario una

separación física mínima, ver la tabla 2.2, pero este aislamiento, deberá estar expuesto tanto a las fuertes oscilaciones de la tensión, con tiempos de subida del frente de onda muy cortos, con niveles del orden de varias veces la tensión nominal y que se producen al operar los interruptores (condiciones de switching, arranques, falsos cierres de los interruptores, arranque en reversa para frenado), así como a las sobretensiones de origen atmosférico por las descargas de rayos en líneas cercanas.- Estos disturbios, tienen frentes de onda con tiempos de subida muy pequeños lo cual equivale a frecuencias muy altas, 10 kHz [22], con lo cual la impedancia del aislamiento entre espiras ( $Z_c = 1/(2 \cdot \pi \cdot f \cdot C_{esp})$ ) toma un valor muy pequeño, pudiendo producirse en aquellas partes débiles del aislamiento entre espiras, micro picaduras que se irán haciendo cada vez más francas, provocando un camino para el paso de la corriente de frecuencia industrial y produciéndose la falla del aislamiento entre espiras y la salida del servicio de la máquina.

Cuando una onda de sobre-tensión alcanza al bobinado de una máquina, dependiendo del tiempo de subida de la onda y de las características de la impedancia de onda del propio bobinado, a medida que ésta ingresa al bobinado y a la longitud del conductor de cada vuelta, esforzará en mayor o menor medida al aislamiento entre espiras. - Será menor el esfuerzo entre espiras cuanto mayor sea el tiempo que tarde el frente de onda en alcanzar su valor máximo, es decir cuanto menor frecuencia equivalente tenga el frente de onda y mayor sea la impedancia que presente el aislamiento. en el Capítulo III, Ap. 3.5, se extiende más sobre este aspecto.



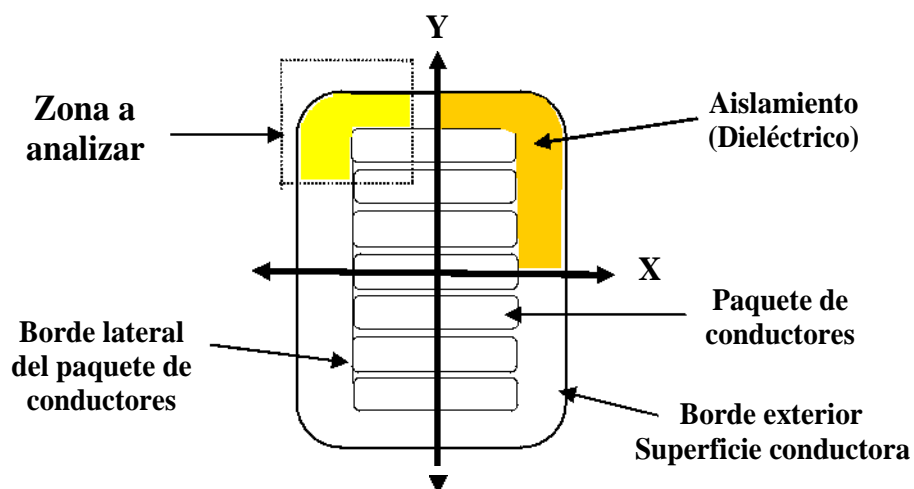
### **CAPÍTULO III**

#### **EVALUACIÓN DEL CAMPO ELÉCTRICO EN EL AISLAMIENTO DE LAS BOBINAS EN LA ZONA DE RANURA**

**3.1. - Introducción.-** En el capítulo anterior se ha indicado que en la sección de ranura, en los lados de parte activa de las bobinas (Ap. 2.2), se tiene una configuración capacitiva de electrodos planos paralelos, y en los bordes se tiene una configuración capacitiva de un sector de línea de conductores cilíndricos coaxiales.

Si se pudiera aplicar una diferencia de potencial eléctrico a estas configuraciones, vistas en forma independiente, entonces, en el dieléctrico ideal, en la configuración de condensadores de electrodos planos, la tensión aplicada se distribuiría en forma lineal entre ambos electrodos, y en la configuración coaxial, se tendría una distribución logarítmica, dependiente de los radios de curvatura de los electrodos interior y exterior.

La combinación en paralelo de ambas configuraciones, da como resultado, la influencia mutua de las configuraciones de los electrodos de ambas zonas, en la distribución del potencial en el dieléctrico y por lo tanto en los gradientes de potencial. -Las caras laterales del paquete de conductores pueden asumirse idealmente y por simplicidad, como caras paralelas, ya que las partes cóncavas que



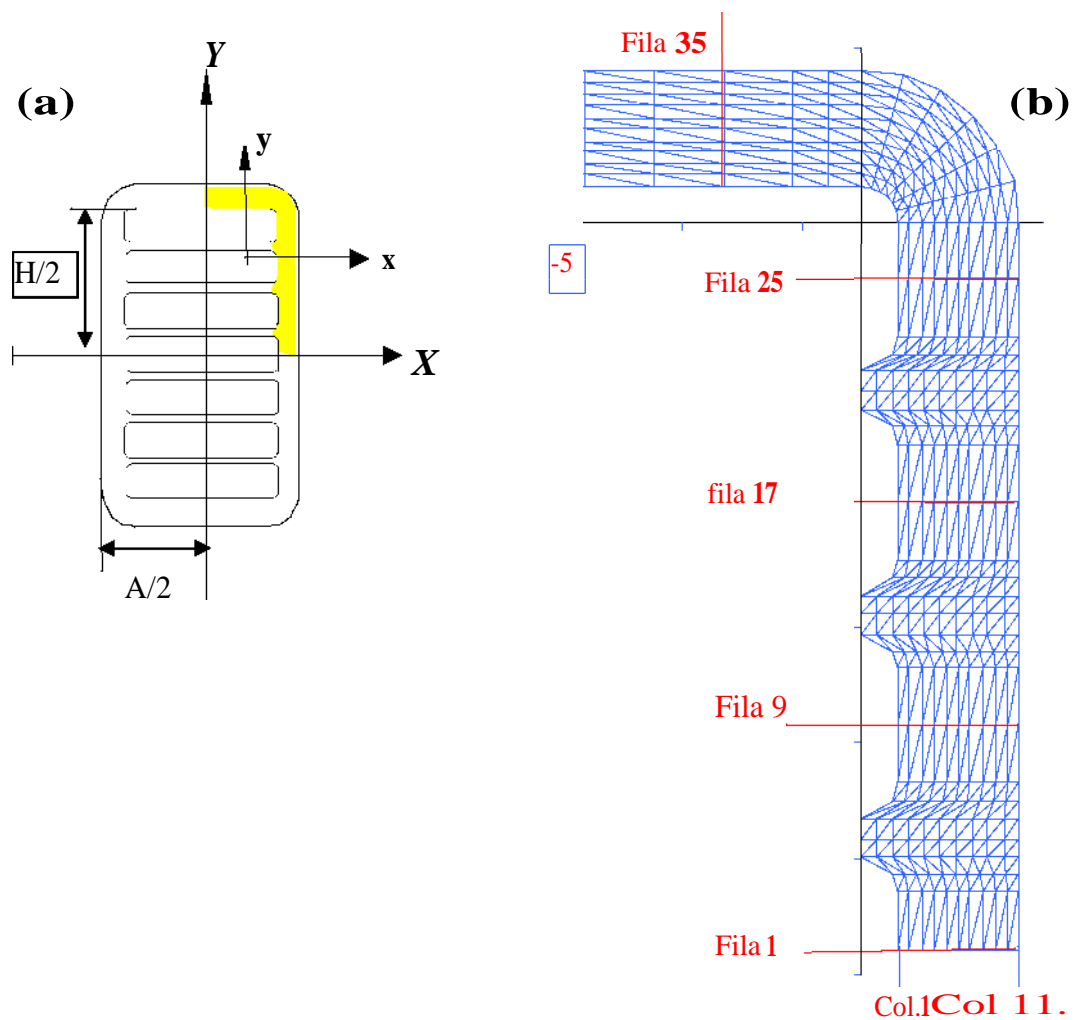
**Fig. 3.1. - Sección de ranura de una bobina de A.T.**

se forman entre los bordes de cada dos conductores adyacentes del paquete, tienen poca influencia en el establecimiento de los gradientes de potencial en el aislamiento contra masa. -Se toma entonces como superficie límite del conductor interior, los bordes laterales más salientes del cobre.- Como resultado de estas consideraciones previas, se tiene entonces una configuración capacitiva, cuyos límites se grafican en la Fig. 3.1 y entre dichos límites, se encuentra el dieléctrico ideal, con permitividad uniforme  $\epsilon$ , a temperatura uniforme de  $T$  °C, representando el aislamiento.

La distribución del potencial (visto en un instante de tiempo dado) en el dieléctrico de la configuración, que se muestra en la Fig. 3. 1, obedece a la ecuación de Laplace (cuando en el dieléctrico no hay presencia de cargas) y el problema de la evaluación de la solución de dicha ecuación, sujeto a las condiciones de frontera es conocido como problema de valores límites o problema de Dirichlet. – Analíticamente es imposible resolver la configuración de la Fig. 3. 1, por lo que hay que recurrir a los métodos numéricos [3], para lo cual se puede disponer una malla de puntos, ubicados convenientemente entre las fronteras del área de análisis y

evaluar los potenciales en cada punto en función de los potenciales de los puntos vecinos; pudiendo usarse los métodos de diferencias finitas o de elementos finitos para efectuar dicha evaluación.

Se aplicará el método de relajación con diferencias finitas para evaluar un juego de curvas equipotenciales en la configuración que nos ocupa y para lo cual se ha



**Fig. 3.2. - (a) Esquema completo del aislamiento de la sección de ranura, dividido en cuatro cuadrantes.**

**(b) Malla para el análisis mediante elementos finitos de un cuadrante del aislamiento de ranura.**

<b>a. -Radio de los bordes del cobre del 50% del espesor del aislamiento.</b>									
Columna	Potencial uniforme	Potencial en las filas:							
		fila 1	fila 9	fila 17	fila 25	fila 29	fila 35	fila 36	fila 37
1	<b>10.00</b>	10.000	10.000	10.000	10.000	10.000	10.000	10.00	10.000
2	<b>9.00</b>	8.980	8.980	8.980	8.920	8.263	8.990	9.000	8.999
3	<b>8.00</b>	7.960	7.960	7.960	7.860	6.859	7.980	8.000	7.999
4	<b>7.00</b>	6.950	6.950	6.950	6.820	5.657	6.980	7.000	6.998
5	<b>6.00</b>	5.940	5.940	5.940	5.790	4.597	5.980	5.990	5.998
6	<b>5.00</b>	4.940	4.940	4.940	4.790	3.645	4.970	4.990	4.998
7	<b>4.00</b>	3.950	3.950	3.950	3.800	2.784	3.980	3.990	3.998
8	<b>3.00</b>	2.960	2.960	2.960	2.840	1.998	2.980	3.000	2.998
9	<b>2.00</b>	1.970	1.970	1.970	1.880	1.277	1.980	2.000	1.999
10	<b>1.00</b>	0.980	0.980	0.980	0.940	0.613	0.990	1.000	0.999
11	<b>0.00</b>	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

<b>b. -Radio de los bordes del cobre del 10% del espesor del aislamiento.</b>									
Columna	Potencial uniforme	Potencial en las filas:							
		fila 1	fila 9	fila 17	fila 25	fila 29	fila 35	fila 36	fila 37
1	<b>10.00</b>	10.000	10.000	10.000	10.000	10.000	10.000	10.000	10.000
2	<b>9.00</b>	8.990	8.920	8.990	8.940	8.036	8.930	8.990	8.999
3	<b>8.00</b>	7.980	7.900	7.980	7.900	6.592	7.870	7.970	7.997
4	<b>7.00</b>	6.980	6.900	6.970	6.870	5.390	6.830	6.960	6.996
5	<b>6.00</b>	5.970	5.910	5.970	5.850	4.347	5.800	5.960	5.996
6	<b>5.00</b>	4.970	4.920	4.970	4.850	3.423	4.800	4.950	4.995
7	<b>4.00</b>	3.980	3.940	3.980	3.860	2.596	3.810	3.960	3.996
8	<b>3.00</b>	2.980	2.950	2.980	2.880	1.849	2.840	2.960	2.996
9	<b>2.00</b>	1.990	1.970	1.990	1.920	1.173	1.890	1.970	1.997
10	<b>1.00</b>	0.990	0.980	0.990	0.960	0.559	0.940	0.990	0.999
11	<b>0.00</b>	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

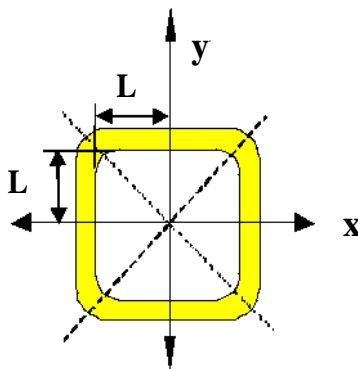
**Tabla No. 3.1. – Potenciales en los nodos de la malla de la Fig. 3.2.b**

desarrollado el programa Equipt.bas en lenguaje Basic del sistema DOS de Microsoft para PCs, el cual, por razones de tiempo de procesamiento, necesita de al menos una PC Pentium. – Con el objeto de efectuar un cálculo refinado en la zona del borde de la configuración, y habiendo limitaciones en cuanto a la cantidad de puntos que admiten las matrices del procesador utilizado, se ha restringido el área a analizar en las partes laterales, a un sector circunscrito a la zona del borde, que se ha resaltado en la fig. 3. 1, tomando en cuenta las siguientes evaluaciones y consideraciones previas:

- Las proporciones usuales del espesor del aislamiento, respecto de la longitud y el ancho de la sección bobina ( usualmente el espesor  $d$  es de 2 a 4 mm, el ancho  $A$  de 10 a 20 mm y la altura  $H$  es de 30 a 50 mm, con lo cual  $A/d \geq 5$  y  $H/2d \geq 5$  a 7)
- La distribución del potencial en las partes laterales del aislamiento, es prácticamente uniforme a poca distancia del borde, lo cual se puede demostrar utilizando el mismo programa Equipt.bas (haciendo  $L = 0,5 * H - 7 * d$ , con lo que se pierde algo de precisión) o utilizando el programa HEAT2D2.BAS del paquete de programas de elementos finitos de [51] que resuelve problemas de campo escalar (resuelve numéricamente la Ec. de Laplace) . -Debido a la forma que tiene la sección del aislamiento, por razones de simetría debería efectuarse el análisis en un cuadrante completo, pero puede simplificarse este análisis a una zona circunscrita al borde como se indica en la Fig. 3.1 mostrando previamente que la distribución del potencial en las partes laterales del aislamiento es prácticamente uniforme hasta una zona cercana al borde, lo cual se puede mostrar usando una malla no tan

refinada en un cuadrante de la sección del aislamiento, (fig. 3.2) pero suficiente para mostrar que la distribución del potencial en las partes laterales es uniforme hasta corta distancia de la zona del borde, cuyos resultados se muestran en la tabla 3.1 para los radios de bordes del cobre del 10% y del 50 % del espesor del aislamiento, donde se puede apreciar que para las filas de nodos Nos 1, 9 y hasta la fila 17 es uniforme; de igual manera en las filas 35 y 36 ( a una distancia  $L = d$ , siendo  $d$  el espesor del aislamiento) por lo cual puede simplificarse el esquema de la figura 3.2.a, en el esquema de la figura 3.3, donde  $L$  se ha fijado en los programas igual a  $1,3*d$  (fig. 3.6) por considerarse que a esa distancia del borde, la distribución del potencial en el aislamiento ya es suficientemente uniforme ( ver los programas Equip.t.bas y BordeW.bas en el anexo)

Para verificar el resultado que se obtiene utilizando el programa Equip.t.bas, el cual usa un esquema en coordenadas cilíndricas para la evaluación de los potenciales en la zona del borde mismo, se ha elaborado también otro programa identificado como BordeW.bas, que utiliza un esquema de transformación conforme de la zona del borde. - Con el objeto de comprobar los resultados, se ha aplicado a la misma



**Fig. 3.3. – Esquema simplificado de la configuración del aislamiento de ranura de las bobinas**

configuración simplificada del borde del aislamiento (fig. 3.3), un esquema de malla con elementos finitos triangulares que se muestra en la Fig. 3.8 y usamos el programa HEAT2D2, obteniéndose el mismo resultado ( Ver figs. 3.19 a 3.23)

**3.2. - Evaluación de una solución de la Ecuación de Laplace utilizando métodos numéricos con diferencias finitas, para el caso que se analiza.** - La aplicación utilizando métodos numéricos, con diferencias finitas, para la evaluación de la solución de la Ecuación de Laplace para el problema de valores límites, consiste en establecer una malla de puntos en la configuración que interesa; en el presente caso, para un sector de medio cuadrante indicado en la Fig. 3.3, y evaluar el potencial en cada punto de la malla, utilizando para ello, aproximaciones para la solución de la ecuación de Laplace, en los sistemas de coordenadas que se adapten a la configuración de los bordes y a la malla de puntos establecida para el cálculo.

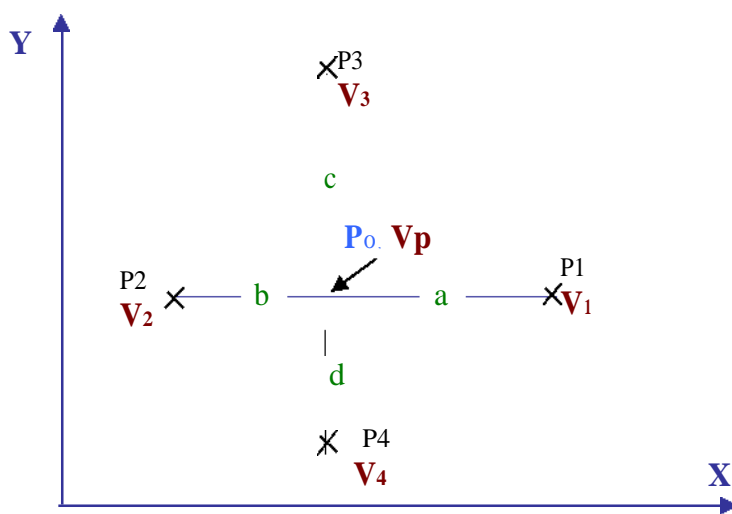
Las aproximaciones para la solución de la Ec. de Laplace en coordenadas cartesianas y cilíndricas que son las que se adaptan para el caso, se presentan a continuación, y para su demostración es necesario identificar en los esquemas planteados en las figuras 3.4 y 3.5, las aproximaciones de las derivadas del potencial en las direcciones requeridas, reemplazarlas en la Ecuación de Laplace y efectuar el tratamiento algebraico necesario [3]. - La exactitud de estas aproximaciones, naturalmente, dependerá de cuan pequeños se tomen los incrementos o las distancias a los puntos vecinos del punto que se evalúa.

**3.2.1. -En coordenadas cartesianas .** - Considérese la Fig. 3.4; en ella se ha ubicado un punto  $P_0$  en el cual se quiere evaluar el potencial  $V_0$ , en función de los

potenciales de cuatro puntos vecinos, ubicados ortogonalmente a las distancias  $a$ ,  $b$ ,  $c$  y  $d$  de  $P_0$ . - La Ecuación de Laplace para problemas bidimensionales en coordenadas cartesianas es la siguiente:

$$\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} = 0 \quad \text{Ec. 3.1}$$

Partiendo de que el primer término de la Ec. de Laplace es la segunda derivada parcial del potencial  $V$  con respecto de la coordenada  $x$ , es decir; la razón de cambio, de la razón de cambio del potencial  $V$  con respecto a  $x$ ; En semejante forma, el segundo término, respecto de la coordenada  $y$ .- La suma de estos dos términos de acuerdo con la Ec. 3.1 debe ser cero.



**Fig. 3.4. - Esquema para el cálculo del potencial en un punto  $P_0$ , con respecto a cuatro puntos circundantes, en coordenadas cartesianas.**

En el esquema de la Figura 3.4, se puede establecer las siguientes aproximaciones para el cálculo de las segundas derivadas del potencial en el punto  $P$ , las que luego se podrán reemplazar en la ecuación de Laplace dada por la Ec. 3.1.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\partial V}{\partial x} \right) \approx \frac{V_1 - V_2 - V_3 + V_4}{a + b} \quad (\alpha) \quad \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{\partial V}{\partial y} \right) \approx \frac{V_3 - V_4 - V_1 + V_2}{c + d} \quad (\beta)$$



Se puede entonces, demostrar la siguiente relación [3]:

$$V_0 = \frac{V_1}{C_1} + \frac{V_2}{C_2} + \frac{V_3}{C_3} + \frac{V_4}{C_4} \quad \text{Ec. 3.2}$$

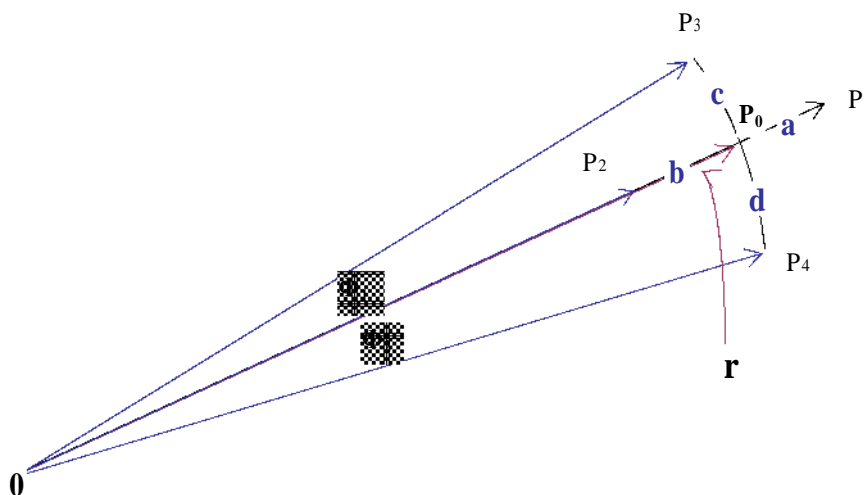
donde:  $C_1 = 1 + \frac{a}{b} \frac{1}{X} \frac{a \cdot b}{c \cdot d}$        $C_2 = 1 + \frac{b}{a} \left(1 + \frac{a \cdot b}{c \cdot d}\right)$

$$C_3 = 1 + d \frac{1}{ab} \frac{1}{J} \frac{a \cdot b}{c \cdot d} \quad C_4 = \left(1 + \frac{d}{c}\right) \left(1 + \frac{a \cdot b}{c \cdot d}\right)$$

**3.2.2. -En coordenadas cilíndricas. -** La Ecuación de Laplace en coordenadas cilíndricas para problemas bidimensionales es la siguiente:

$$\frac{\partial^2 v}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial v}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 v}{\partial \theta^2} = 0 \quad \text{Ec. 3.3}$$

Para establecer una aproximación numérica para la evaluación de los potenciales en una malla de puntos bidimensional en coordenadas cilíndricas, establecemos el esquema de la figura No. 3.5 y observamos que el primer término de la Ec.3.3 es la



**Fig. 3.5. -** Esquema para el cálculo del potencial en un punto P<sub>0</sub>, con respecto a cuatro puntos circundantes, en coordenadas cilíndricas.

razón de cambio de la razón de cambio del potencial respecto a la posición radial  $r$  de  $P_0$ , o sea:

$$\frac{1}{4r} \frac{d}{dr} \left( \frac{1}{4r} \frac{dV}{dr} \right) = \frac{V_1 - V_0}{a^2 (2r+a)} - \frac{V_0 - V_2}{b^2 (2r-b)} \quad (a)$$

En el límite, cuando  $\Delta r \Rightarrow 0$ , ésta aproximación se convierte en la segunda derivada de  $V$  respecto de  $r$ . -Para el segundo término, establecemos un promedio de las razones de cambio hacia la izquierda y hacia la derecha.

$$\text{En el intervalo } P_1-P_0 \quad \frac{1}{r_1} \frac{dV}{dr} = \frac{V_1 - V_P}{a \cdot r + \frac{a}{2}}$$

$$\text{En el intervalo } P_0-P_2 \quad \frac{1}{r_2} \frac{dV}{dr} = \frac{V_P - V_2}{b \cdot r - \frac{b}{2}}$$

Tomando el promedio de las dos expresiones anteriores se tiene:

$$\frac{1}{r} \frac{dV}{dr} \Big|_{\text{medio}} = \frac{V_1 - V_2}{a \cdot 2r + a} + \frac{V_1 - V_2}{b \cdot 2r - b} \quad (b)$$

Para el tercer término, en la posición  $r$ :

$$\frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left( \frac{1}{4r} \frac{dV}{dr} \right) = \frac{V_3 - V_P - V_P - V_4}{\frac{r_1 + r_2}{2}} = \frac{2 \cdot (V_3 - V_P)}{r_1 + r_2} - \frac{2 \cdot (V_P - V_4)}{r_1 + r_2} \quad (c)$$

donde:  $r \cdot \theta_1 = c$  y  $r \cdot \theta_2 = d$ . - Reemplazando  $\theta_1$  y  $\theta_2$  en la expresión  $\theta$ , se tiene:

$$\frac{1}{r^2} \frac{d}{dr} \left( \frac{1}{4r} \frac{dV}{dr} \right) = \frac{2 \cdot (V_3 - V_P)}{c \cdot c + d} - \frac{2 \cdot (V_P - V_4)}{d \cdot c + d} \quad (d)$$

Remplazando estas aproximaciones,  $\alpha$ ,  $\beta$  y  $\gamma$ , de los tres términos de la ecuación de Laplace en coordenadas cilíndricas, en la Ec. 3.3 para configuraciones bidimensionales, se tiene:

$$V_0 = V_1.C_1 + V_2.C_2 + V_3.C_3 + V_4.C_4 \quad \text{Ec. 3.4}$$

$$\text{Donde: } C_1 = \frac{C_{01} + C_{05}}{C_{00}}, \quad C_2 = \frac{C_{02} - C_{06}}{C_{00}}, \quad C_3 = \frac{C_{03}}{C_{00}}, \quad C_4 = \frac{C_{04}}{C_{00}}$$

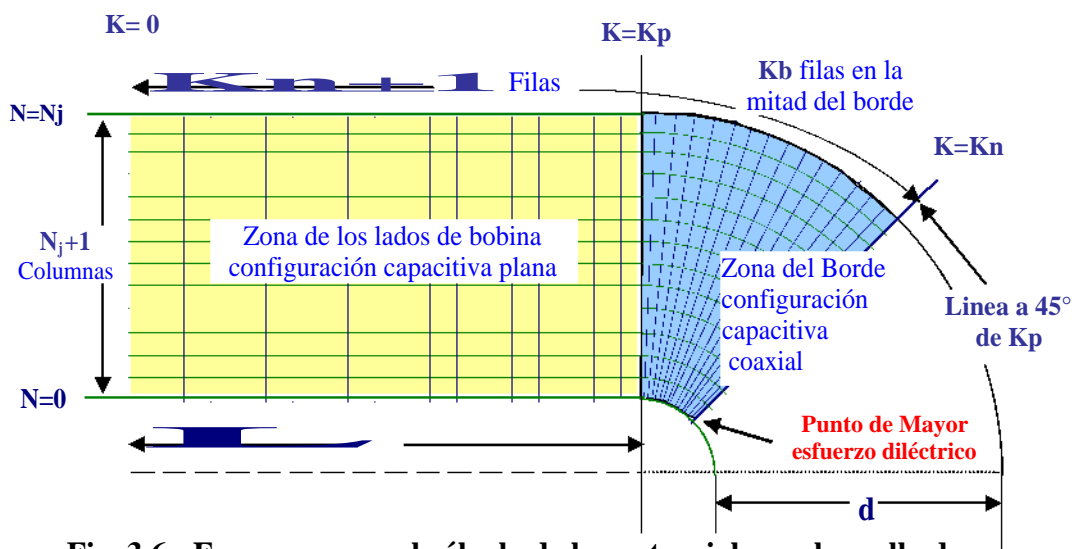
$$y = C_{01} \frac{2}{a \cdot a + b}, \quad C_{02} \frac{2}{b \cdot a + b}, \quad C_{03} = \frac{2}{c \cdot c + d},$$

$$C_{04} = \frac{1}{c + d}, \quad C_{05} = \frac{1}{a \cdot 2r + a}, \quad C_{06} = \frac{1}{b \cdot 2r - b},$$

$$C_{00} = C_{01} + C_{02} + C_{03} + C_{04} + C_{05} - C_{06}$$

Existen por lo menos cuatro formas de expresar una aproximación para la evaluación numérica de la Ec. de Laplace en coordenadas cilíndricas. - La que se ha utilizado aquí, es una aproximación válida ya que el error en la posición radial para el cálculo de la aproximación de las primeras derivadas, es pequeño, si la relación de la distancia entre los puntos de una malla dada, respecto de la posición radial, es suficientemente pequeña (depende esto, de cómo ubicar la aproximación de la derivada en el intervalo analizado)

**3.3. -Evaluación de las curvas equipotenciales en el sector del borde. -** La malla de puntos, para el cálculo de los potenciales, se ha establecido por conveniencia de tal forma que en la zona lateral (plana) de la configuración, el cálculo se realice en coordenadas cartesianas; y en el borde, en coordenadas cilíndricas, ver la Fig.3.6. - La malla consta de  $K_{p+1}$  filas de puntos en la parte lateral, de configuración plana y



**Fig. 3.6. -Esquema para el cálculo de los potenciales en la malla de  $K_{n+1}$  Filas x  $N_{j+1}$  Columnas, por el método de relajación.**

de  $K_b$  filas de puntos en la parte curva, hasta la mitad del borde; en total  $K_n + 1$  filas de puntos. - Asimismo consta de  $N_{j+1}$  columnas de puntos

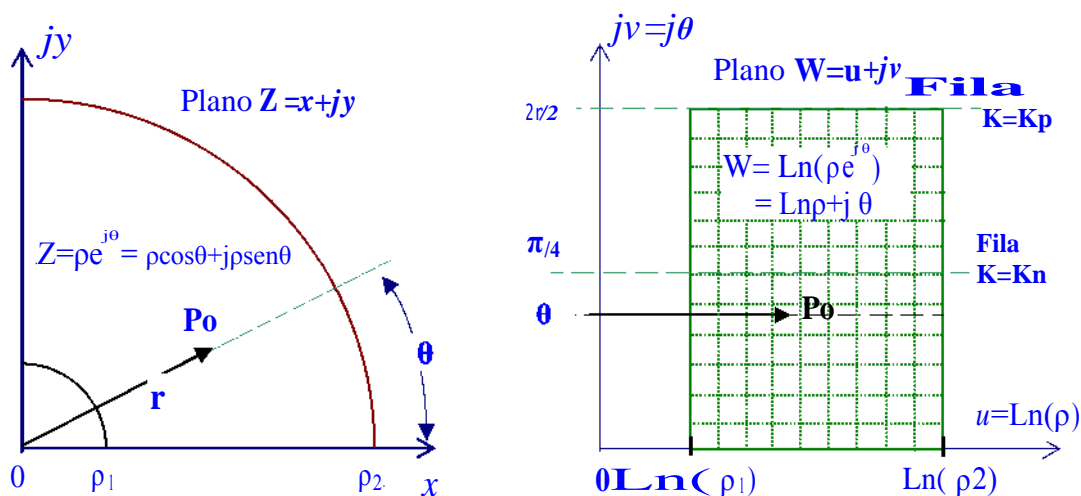
Como se ha indicado en el acápite 3.1, para la evaluación de los potenciales en los puntos de la malla propuesta, se ha construido el programa Equipt.bas en lenguaje QBASIC del ambiente DOS para PC. -El diagrama de flujo simplificado de este programa se muestra en el Anexo. - El cálculo de los potenciales en la malla de puntos necesita efectuarse repetidamente efectuando primero una evaluación inicial aproximada, de dichos potenciales, para luego aplicar la técnica de la relajación, que consiste en la evaluación sistemática y ordenada de los potenciales en todos los puntos de la malla, utilizando los potenciales de los puntos vecinos, calculados en la iteración previa de todos los puntos de la malla.

Al efectuar la evaluación de los potenciales en los nodos de la malla aplicada a la configuración dada, el cálculo en la parte plana se desarrolla en coordenadas cartesianas y en la parte del borde, se efectúa en coordenadas cilíndricas, presentándose la necesidad de efectuar el cálculo de los potenciales en la frontera

entre la parte plana, y la parte del borde de bobina.- Para el caso se ha utilizado la aproximación que da la Ec.3.2, para lo cual se ubica el punto No. 4, ( $P_4$  de la Fig. 3.4) mediante la subrutina cuadro2 en el programa Equipt.bas, en la línea  $k=Kp+1$  de la malla, en la primer fila de la zona del borde.

Las iteraciones de cálculo de potenciales  $V(j, k)$  en los puntos de la malla, se realizan a partir de los valores iniciales calculados previamente, comenzando de la fila  $k=0$  hasta  $k=Kn$ . – En esas dos filas que son límites con las mallas adyacentes, las cuales son un espejo del sector que se analiza, el potencial del punto 4 se hace igual al potencial del punto 3. – Los potenciales de los puntos 1 y 2 se toman en la fila  $k$  en las columnas  $j-1$  y  $j+1$ .

En las tablas Nos. 3.3 a 3.7 se listan los resultados de las corridas del programa Equipt. donde se muestran los valores calculados de los potenciales de algunos puntos representativos de la malla, para los radios de borde ( $r_0$ ) indicados, del 10, 20, 30, 40 y 50% del espesor “ $d$ ” del aislamiento, al cual por comodidad se ha tomado igual a  $d=10$  unidades. - En las figuras 3.9 a 3.13 se muestran los gráficos de las equipotenciales ubicadas por el mismo programa Equipt.bas de acuerdo a los potenciales evaluados en todos los puntos de la malla en las corridas correspondientes a cada radio ( $r_0$ ) de borde del cobre indicado. – Este programa también genera una base de datos con el gradiente del potencial promedio en cada diferencia finita de espacio entre puntos vecinos de una misma fila, siendo de interés especial la característica del gradiente en la fila  $Kn$ , o sea, en la parte media del borde, lo cual se ha resumido en la tabla No. 3.13.

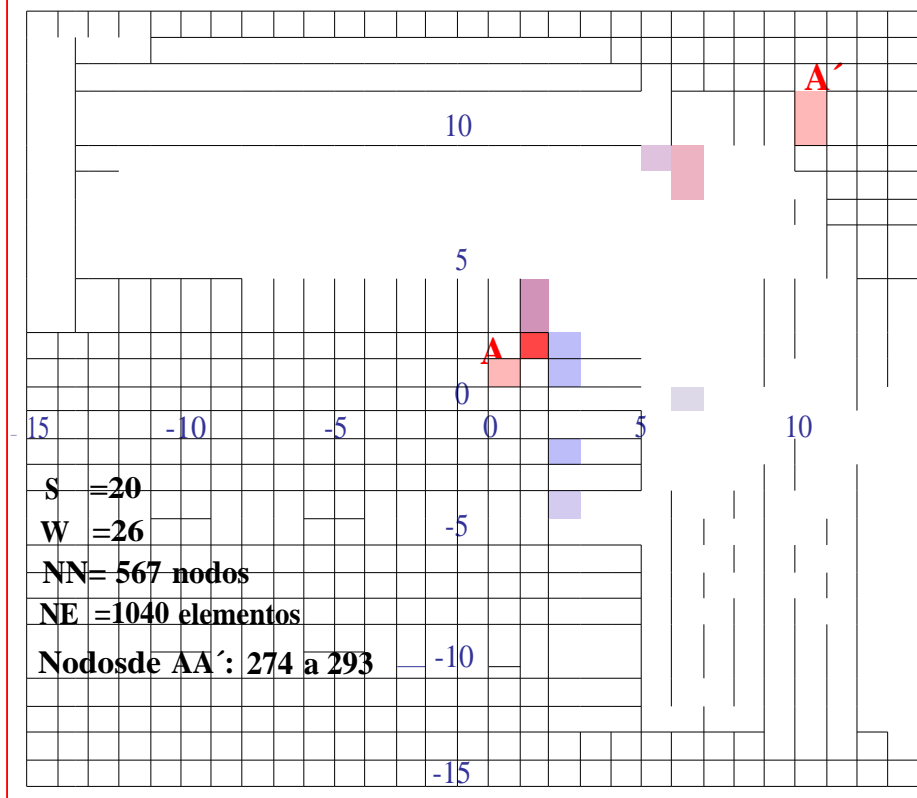


**Fig. 3.7. - Transformación conforme del cuadrante del borde, en un sector rectangular, mediante la transformación  $W = \text{Ln}(Z)$**

**3.3.1. - Comprobación de los resultados obtenidos mediante una transformación conforme de los límites de la zona del borde y mediante el método de elementos finitos [51].** - Sin embargo, es válido plantearse, cuan exacto es el resultado que se obtiene con el modelo descrito en el punto anterior, ya que los resultados de las curvas equipotenciales obtenidas como solución de la ecuación de Laplace, que arrojan las corridas de este programa; tablas Nos. 3.3 a 3.7 y Figs. 3.9 a 3.13, difieren en cierta proporción de lo que plantea A. Wichman [14] en la tabla I de su reporte, y que se copia aquí como la Tabla 3.2, en la que simplemente indica que la relación del campo eléctrico máximo  $E_M$ , en el borde de la bobina, respecto del campo eléctrico uniforme de las partes laterales, ( fila  $K_n$  de la fig. 3.6) esta dado por la Ec. No 1.17, que corresponde a lo que ocurre en una distribución coaxial pura, como en un cable unipolar con pantalla exterior de tierra.

Se busca entonces comprobar, cual es la distribución del potencial y del campo eléctrico en el aislamiento del borde de la bobina, observando con especial interés, la

**Fig. 3.8. - Malla para el cálculo de los potenciales en los nodos, mediante el método de elementos finitos, para un radio del borde del cobre del 30% del espesor del aislamiento.**



distribución de potenciales en la línea identificada como Kn, que está a  $45^\circ$  de la frontera entre las zonas plana y del borde, que es donde se presenta el mayor esfuerzo dieléctrico junto al borde del conductor de cobre. – Con este objeto, y observándose que la zona del borde, es un cuadrante que es factible de ser transformado mediante una transformación conforme, del plano original  $Z(x,y)=X+jY$ , a un plano  $W(u,v)=U+jV$ , donde la nueva configuración del cuadrante coaxial transformado, se muestra como un rectángulo con escalas lineales, al aplicarle la transformación:  $W=L_n(Z)$ ; donde  $Z=\rho e^{j\theta} = \rho(\cos\theta + j\text{sen}\theta)$ , y

$W = \text{Ln}(\rho e^{j\theta}) = \text{Ln}\rho + j\theta$ , tal como se muestra en la Fig. 3.7. - Entonces a este rectángulo obtenido, que representa al borde del aislamiento, se le puede aplicar como valores de frontera en las líneas  $v=j \cdot n/2$  y  $v=0$ , los potenciales obtenidos con el programa Equipt.bas, en la fila de la malla que es frontera entre la zona plana y la zona del borde ( fila Kp en la Fig. 3.6 ), y mediante el uso de la misma técnica para la evaluación de la ecuación de laplace (de diferencias finitas y relajación de potenciales en los nodos de la malla), utilizando ahora una malla de puntos en el sector transformado, adaptada para usar la Ec.3.2 en coordenadas cartesianas, elaboramos un programa similar , al que llamamos BordeW.bas cuyo diagrama de bloques se muestra en el Anexo, con el cual se obtiene la distribución de equipotenciales para comprobar los resultados obtenidos con el programa Equipt.bas, los resultados se listan en las tablas 3.8 a 3.12, y sus gráficas superpuestas con las gráficas de los resultados del programa Equipt, se muestran en las figuras 3.14 a 3.18, mediante lo cual se puede apreciar que para efectos prácticos, no hay diferencia entre ambos resultados. – En dichas figuras, se observa un error menor que el 2% (en la zona media del borde) para el caso del radio del borde del cobre del 10 % del espesor del aislamiento, en los demás gráficos, estas equipotenciales prácticamente se superponen, o sea, concuerdan casi exactamente, por lo que como se dijo anteriormente, se puede plantear que el resultado es correcto.

Los valores de los potenciales en los puntos de la malla y a partir de éstos, la posición de las equipotenciales, y la tabulación del campo eléctrico en el borde; son generadas por el programa Equipt.bas y contrastadas por comparación con los resultados del programa BordeW.bas mediante superposición de las gráficas



indicadas líneas arriba; éstos resultados son almacenados en los archivos dataR%.doc, datgR%.xls, VLKpR%.dat, convR%.dat, GradR%.dat, MatVR%.dat en ambiente DOS para posteriormente ser procesados y generar las tablas y los gráficos correspondientes con el procesador Word y Excel de Microsoft®.

Con el objeto de tener un resultado aun más consistente, se ha efectuado la verificación de la distribución de potenciales y del gradiente del potencial en el borde utilizando un programa para el cálculo de los potenciales en los nodos de la malla, Fig. 3.8, mediante elementos finitos [51], utilizando el programa disponible HEAT2D2 el cual resuelve la Ec. de Laplace y se adecua para el caso presente. - El resultado de la distribución del gradiente del potencial en la zona media del borde (fila  $k=K_n$  en la Fig. 3.6 y línea AA de la Fig. 3.8) obtenido mediante ambos métodos, con diferencias finitas y con elementos finitos se muestra en las tablas 3.13 y 3.14, y sus gráficas se muestran en las figuras 3.19 a 3.24 en las que solo se observa una curva para el resultado evaluado ya que la diferencia no es muy perceptible en forma gráfica. – En estas gráficas (Figs 3.19 a 3.24), se ha incluido también la gráfica de la Ec. 1.16 que corresponde al gradiente del potencial en el aislamiento para el caso de la línea de conductores cilíndricos coaxiales.

**3.3.2. – Interpretación de los resultados.** - El gráfico de la comparación de relación de esfuerzos dieléctricos  $E_r / E_{unif}$  (la superposición de los gráficos 3.19 a 3.23), se muestra en la figura 3.24. -Con este resultado obtenido mediante una cuidadosa evaluación de la distribución de las equipotenciales en la zona del borde del aislamiento de una bobina típica, observamos que la influencia de la configuración

de la parte plana del aislamiento sobre la parte del borde es notable. - En una distribución coaxial pura, en un cable unipolar con pantalla de tierra por ejemplo, la distribución del campo eléctrico, cumple una ley conocida dada por la Ec. 1.16, la cual se repite aquí por comodidad como la Ec. No. 3.5:

$$E_r = \frac{V}{r \cdot \ln \frac{r_o + d}{r_o}} \quad \text{Ec. 3.5}$$

Si calculamos la relación del campo eléctrico máximo  $E_M$  ( que es el que se da sobre el borde del cobre), respecto al campo eléctrico uniforme en las partes laterales  $E_{med} = E_{unif} = V/d$ , tenemos la relación:

$$k = \frac{E_{MAX}}{E_{med}} = \frac{E_{MAX}}{E_{unif}} = \frac{d}{r_o \cdot \ln \frac{r_o + d}{r_o}} \quad \text{Ec. 3.6}$$

Esta ecuación, como mencionamos antes, utiliza A. Wichman. a modo de ilustración se entiende, en su reporte sobre el progreso y experiencia en sistemas de aislamiento para máquinas eléctricas grandes [14] y en función de dicha relación, muestra en dicho artículo, la tabla I, la cual se ha copiado aquí como la tabla 3.2.

De acuerdo al resultado que se obtiene con los programas Equip.t.bas, BordeW.bas, y mediante el análisis con elementos finitos [51]; debido a la influencia de la distribución de equipotenciales cuasi uniforme en el aislamiento de los laterales de la sección de las bobinas, concluimos que en el borde no se presenta un campo eléctrico máximo exageradamente alto, cuando el radio del borde del cobre es pequeño, como el mostrado en la tabla 3.1 que hace uso de la Ec. 3.6, pero se observa que es respetablemente alto (considerándose el dieléctrico ideal).

Table I					
Electric field strength for various insulation					
Thicknesses d and edge radii r.					
Rated Voltage	Insulation Thickness	Electric Field Strength (Uniform)	Electric field Strength (Edges)	Ratio	Conductor Edge Radius
$V_N$ kV	d mm	E kV/mm	$E_{max}$ kV/mm	$E_{max}/E$	$r_o$ mm
10	3,0	1,92	5,37	2,79	0,6
10	3,0	1,92	4,16	2,16	1,0
21	6,0	2,02	8,42	4,17	0,6
21	6,0	2,02	3,67	1,82	3,0
27	7,3	2,13	10,07	4,72	0,6
27	6,5	2,40	4,51	1,88	3,0
30	8,0	2,16	10,84	5,02	0,6
30	7,2	2,41	4,72	1,96	3,0
40	9,5	2,43	5,39	2,22	3,0
40	8,0	2,89	4,83	1,67	5,0
$E_{max} = \frac{d}{r_o \ln \left( \frac{d+r_o}{r_o} \right)}$ <p>Electric Field Strength At the Edges of Conductors</p>			$E = \frac{V_N}{d \cdot 3}$ <p>Electric Field Strength of the Uniform Field</p>		

**Tabla 3.2. – Niveles de campo eléctrico en el aislamiento de los bordes de las bobinas según [14]**

En los gráficos 3.9 a 3.18, se observa una influencia mutua entre ambas zonas, especialmente en la parte donde éstas limitan, siendo el Campo Eléctrico máximo  $E_{MAX}$ , o la relación  $E_{MAX}/E_{unif}$  en la zona media del borde, junto al cobre, menor que el dado por las Ec. 3.5 o 3.6 pero es algo mayor hacia el borde exterior (ver las Figs 3.19 a 3.23)

En la Fig. 3.21, donde se han superpuesto estas graficas, se observa, que en el 60 % del espesor del aislamiento, hacia el lado del conductor exterior, el aislamiento es sub-esforzado respecto del esfuerzo dieléctrico uniforme; y en el 40% del espesor del aislamiento, sobre el borde del cobre, el aislamiento es sobre-esforzado. - De esto y de la Tabla 3.2, se puede apreciar, que los diseños en las máquinas grandes según la tendencia antigua, trabajaban en condiciones normales, como actualmente se logran en condiciones de prueba, y una especificación del cobre inadecuada condujo a que las bobinas para los niveles de 21 kV y más, tuvieran [[14] una vida corta, ya que en las condiciones de las pruebas de duración, el aislamiento en la zona de los bordes, trabajaba sometido a esfuerzos cercanos al de rotura del dieléctrico. y tenían una expectativa de vida menor debido a esta circunstancia no cuantificada; notándose además el hecho, de que en las máquinas más chicas, con un nivel de tensión respetable puede tenerse la paradoja de que al tenerse un número de espiras alto, y una sección del conductor pequeña, con un espesor del cobre, pequeño, es menos posible diseñar el borde del cobre con el suficiente radio como para reducir adecuadamente la concentración de campo eléctrico en los bordes, como sí lo es en las bobinas de las grandes máquinas donde el perfil del conductor es especialmente diseñado (donde el aislamiento puede ser aplicado sin ser alterada su isotropía), entonces en las máquinas relativamente menores con niveles de tensión de 6 a 14 kV, pueden tenerse esfuerzos de campo considerables, en los bordes de las bobinas, lo cual es un factor a tenerse muy en cuenta con las máquinas modernas, de diseño optimizado y procesos de fabricación de alta tecnología, si estas tuvieran que ser reconstruidas localmente. -Debido al fenómeno de concentración del campo eléctrico en los bordes, al efectuarse las pruebas de tensión aplicada o de duración del

aislamiento, se tienen entonces dos niveles de esfuerzo dieléctrico definidos: uno de ellos es el nivel de esfuerzo de campo eléctrico promedio  $E_{med}$  o uniforme  $E_{unif}$ , que nominalmente lo podemos definir como que es igual a la tensión nominal de la máquina  $V_n$ , dividida entre el espesor de pared contra masa “ $d$ ” del aislamiento,  $V_n/d$  en kV/mm (aunque en realidad, en una máquina trifásica el aislamiento trabaja con una tensión contra masa que es igual a la tensión entre líneas dividido entre  $\sqrt{3}$ ) El otro nivel de esfuerzo dieléctrico, que es el que realmente importa, es el que se da casi puntualmente, en los bordes, sobre el cobre, principalmente en las bobinas que están gradualmente más cerca de las líneas (primeras bobinas sometidas al mayor esfuerzo dieléctrico) y depende del radio de curvatura del borde del cobre, y puede ser según el espesor del aislamiento, de acuerdo a las Fig. 3.24 y 3.25 de hasta 3 veces el campo eléctrico promedio. -Esta condición del aislamiento en los bordes que es la que determina como es solicitado el aislamiento en las diferentes condiciones de aplicación de tensión, puede visualizarse mejor mediante el factor de utilización del aislamiento, el cual se ha mostrado en el ap. 1.6, y para el caso del aislamiento de las bobinas no es mas que la inversa de la relación  $k$  de la Ec. 3.6 como se muestra:

Para cualquier dispositivo aislante la tensión de perforación es igual a la rigidez dieléctrica evaluada para una muestra de material aislante plano de espesor  $d$ , multiplicada por el espesor ficticio, o sea, por el producto del espesor del aislamiento por el factor de utilización  $\eta$  del aislamiento para la configuración dada; o sea, la relación, aplicada a la zona del borde:  $U_p = E_p \cdot d \cdot \eta = E_p \cdot d \cdot \eta$ . – El nivel de la tensión de perforación crea en las partes laterales un campo eléctrico uniforme dado por la relación  $U_p = E_{unif} \cdot d = (E_p/k) \cdot d$  lo cual reemplazando en la relación anterior

$(E_p/k) \cdot d = U_p = E_p \cdot d \cdot \eta$ , de lo cual se tiene  $\eta = 1/k$ . – Esta relación se ha graficado en la fig. 3.26 y es más ilustrativa que las graficas de la Fig. 3.25 en cuanto muestra, cuánto efectivamente del costo del aislamiento, es realmente efectivo debido a la concentración de campo en los bordes.

En la Fig 3.24 se observa que en el 10% del aislamiento del borde junto al cobre, o sea en el aislamiento del cobre y de las espiras, es donde se da el mayor nivel de campo eléctrico y gradualmente menos en el tubo aislante contra masa de la bobina.

Para tener un mejor concepto de esto, se presentan los cuadros 3.15 a 3.21, donde se muestran los niveles del campo eléctrico, que se tienen cuando se efectúan las pruebas de duración o de tensión aplicada a los aislamientos de las bobinas de las máquinas de AT.- En ellos y tomando en consideración la característica de envejecimiento de los aislamientos ( Ver fig. 1.4) se ve que es fácil quemar el aislamiento del bobinado de una máquina de AT que tenga los bordes del conductor no diseñados adecuadamente, o debido a que en algún punto de esa zona el cobre o el dieléctrico no ostente las características requeridas debido a un inadecuado proceso de fabricación (ver acápite 1.3.2). – Por ello los aislamientos que se utilicen para aislar el cobre, deben tener una rigidez dieléctrica mucho mayor que la utilizada para el aislamiento principal.

Con las resinas epóxicas, se conoce [11], que se ingresa a otro fenómeno indeseado que se presenta al existir niveles altos de campo eléctrico y temperaturas de mas de 120 °C localizados, como se expone en el siguiente capítulo.

Tabla No 3.3

<<<=====Programa Equipt.bas=====>>>

Radio del borde : 10 % del espesor del aislamiento.

Espesor del aislamiento: 10 unidades base.

Potencial aplicado : 10 unidades base.

Numero de iteraciones : 150 (Iteraciones previas: 4000)

1.- Valores calculados en primera aproximación, de los potenciales en los puntos Z(i,j) de la malla de 68 filas X 201 columnas

col.:0	20	40	60	80	100	120	140	160	180	200	
fila \	Potencial en los puntos (j,k)										
0	10.0	9.000	8.000	7.000	6.000	5.000	4.000	3.000	2.000	1.000	0.00
4	10.0	8.928	7.877	6.853	5.847	4.854	3.870	2.894	1.924	0.960	0.00
8	10.0	8.911	7.828	6.775	5.754	4.759	3.783	2.821	1.873	0.933	0.00
12	10.0	8.897	7.799	6.732	5.700	4.699	3.726	2.773	1.837	0.915	0.00
16	10.0	8.879	7.768	6.692	5.655	4.654	3.683	2.736	1.811	0.900	0.00
20	10.0	8.855	7.728	6.644	5.605	4.605	3.640	2.701	1.785	0.887	0.00
24	10.0	8.825	7.678	6.585	5.545	4.549	3.590	2.661	1.757	0.872	0.00
28	10.0	8.785	7.615	6.513	5.471	4.481	3.531	2.615	1.724	0.855	0.00
32	10.0	8.730	7.534	6.422	5.382	4.399	3.461	2.559	1.686	0.835	0.00
36	10.0	8.654	7.428	6.308	5.271	4.299	3.377	2.493	1.639	0.811	0.00
40	10.0	8.545	7.288	6.163	5.135	4.178	3.275	2.414	1.584	0.782	0.00
44	10.0	8.388	7.103	5.980	4.967	4.031	3.153	2.319	1.518	0.747	0.00
48	10.0	8.157	6.858	5.750	4.761	3.854	3.007	2.206	1.440	0.706	0.00
52	10.0	7.824	6.540	5.462	4.509	3.641	2.834	2.073	1.347	0.656	0.00

Zona del borde de bobina (Sector coaxial)

ang(o) \	Potencial en los puntos (j,ang(k))										
0	10.0	7.824	6.540	5.462	4.509	3.641	2.834	2.073	1.347	0.656	0.00
15	10.0	7.616	6.294	5.183	4.206	3.329	2.534	1.810	1.150	0.548	0.00
30	10.0	7.494	6.154	5.034	4.059	3.193	2.417	1.720	1.090	0.519	0.00
45	10.0	7.453	6.109	4.987	4.013	3.152	2.384	1.694	1.073	0.511	0.00

2.- Relajación:/ Iteración No: 4075

col.:0	20	40	60	80	100	120	140	160	180	200	
fila \	Potencial en los puntos (j,k)										
0	10.0	8.985	7.971	6.960	5.953	4.950	3.953	2.960	1.971	0.985	0.00
4	10.0	8.984	7.969	6.958	5.951	4.948	3.951	2.958	1.970	0.984	0.00
8	10.0	8.982	7.966	6.953	5.945	4.942	3.945	2.953	1.966	0.982	0.00
12	10.0	8.978	7.959	6.944	5.934	4.931	3.935	2.945	1.960	0.979	0.00
16	10.0	8.973	7.949	6.930	5.918	4.914	3.919	2.932	1.950	0.974	0.00
20	10.0	8.965	7.934	6.910	5.895	4.890	3.897	2.913	1.937	0.967	0.00
24	10.0	8.954	7.912	6.880	5.861	4.856	3.865	2.886	1.918	0.957	0.00
28	10.0	8.937	7.881	6.839	5.815	4.809	3.822	2.851	1.893	0.944	0.00
32	10.0	8.913	7.837	6.781	5.750	4.744	3.763	2.803	1.859	0.926	0.00
36	10.0	8.878	7.773	6.699	5.660	4.656	3.684	2.739	1.814	0.903	0.00
40	10.0	8.824	7.679	6.581	5.536	4.537	3.580	2.655	1.755	0.873	0.00
44	10.0	8.736	7.534	6.412	5.365	4.379	3.443	2.546	1.680	0.834	0.00
48	10.0	8.580	7.305	6.169	5.133	4.173	3.269	2.409	1.583	0.784	0.00
52	10.0	8.248	6.940	5.827	4.829	3.911	3.052	2.238	1.462	0.717	0.00

Zona del borde de bobina:

ang(o) \	Potencial en los puntos (j,ang(k))										
0	10.0	8.248	6.940	5.827	4.829	3.911	3.052	2.238	1.462	0.717	0.00
9	10.0	8.113	6.750	5.606	4.594	3.676	2.830	2.045	1.313	0.631	0.00
18	10.0	8.011	6.606	5.440	4.421	3.508	2.679	1.920	1.224	0.585	0.00
27	10.0	7.939	6.504	5.325	4.304	3.397	2.581	1.842	1.170	0.558	0.00
36	10.0	7.896	6.444	5.258	4.235	3.333	2.526	1.799	1.141	0.544	0.00
45	10.0	7.882	6.424	5.235	4.213	3.312	2.508	1.785	1.132	0.539	0.00

## 3.- Relajación:/ Iteración No: 4150

col.:0	20	40	60	80	100	120	140	160	180	200	
fila \	Potencial en los puntos (j,k)										
0	10.0	8.985	7.971	6.960	5.953	4.951	3.953	2.960	1.971	0.985	0.00
4	10.0	8.984	7.970	6.958	5.951	4.949	3.951	2.958	1.970	0.984	0.00
8	10.0	8.982	7.966	6.953	5.945	4.942	3.945	2.954	1.966	0.982	0.00
12	10.0	8.979	7.959	6.944	5.935	4.931	3.935	2.945	1.960	0.979	0.00
16	10.0	8.973	7.949	6.930	5.918	4.915	3.919	2.932	1.951	0.974	0.00
20	10.0	8.965	7.934	6.910	5.895	4.891	3.897	2.913	1.937	0.967	0.00
24	10.0	8.954	7.912	6.881	5.862	4.857	3.865	2.887	1.918	0.957	0.00
28	10.0	8.937	7.882	6.840	5.815	4.809	3.822	2.851	1.893	0.944	0.00
32	10.0	8.913	7.838	6.782	5.750	4.745	3.763	2.803	1.859	0.927	0.00
36	10.0	8.878	7.774	6.699	5.661	4.657	3.684	2.739	1.814	0.903	0.00
40	10.0	8.824	7.679	6.582	5.536	4.538	3.580	2.655	1.755	0.873	0.00
44	10.0	8.737	7.534	6.412	5.365	4.379	3.443	2.547	1.680	0.834	0.00
48	10.0	8.580	7.306	6.169	5.134	4.173	3.269	2.409	1.584	0.784	0.00
52	10.0	8.248	6.940	5.827	4.830	3.912	3.052	2.238	1.462	0.717	0.00

## Zona del borde de bobina:

ang(o) \	Potencial en los puntos (j,ang(k))										
0	10.0	8.248	6.940	5.827	4.830	3.912	3.052	2.238	1.462	0.717	0.00
9	10.0	8.114	6.750	5.606	4.595	3.676	2.831	2.045	1.313	0.631	0.00
18	10.0	8.011	6.606	5.441	4.422	3.509	2.679	1.920	1.224	0.585	0.00
27	10.0	7.939	6.504	5.326	4.304	3.397	2.581	1.842	1.170	0.558	0.00
36	10.0	7.896	6.444	5.258	4.236	3.333	2.526	1.799	1.141	0.544	0.00
45	10.0	7.882	6.425	5.236	4.213	3.312	2.508	1.785	1.132	0.539	0.00

## 4.- Resultado:

Posición x (desde el cobre), de las Equipotenciales  
vistas en % de la tensión aplicada

Espesor del aislamiento: 10 unidades base

Radio del borde: 10 % del espesor del aislamiento

Pos\Eq.	90%	80%	70%	60%	50%	40%	30%	20%	10%	0%
0	0.984	1.970	2.959	3.952	4.950	5.952	6.959	7.970	8.984	10.0
4	0.984	1.969	2.958	3.950	4.948	5.950	6.957	7.969	8.983	10.0
8	0.982	1.965	2.953	3.944	4.942	5.944	6.952	7.965	8.981	10.0
12	0.979	1.959	2.944	3.934	4.931	5.934	6.944	7.959	8.978	10.0
16	0.973	1.949	2.931	3.918	4.914	5.918	6.930	7.949	8.973	10.0
20	0.966	1.935	2.911	3.895	4.890	5.895	6.910	7.935	8.965	10.0
24	0.955	1.915	2.883	3.863	4.856	5.863	6.883	7.915	8.955	10.0
28	0.940	1.886	2.844	3.817	4.808	5.818	6.845	7.887	8.940	10.0
32	0.919	1.847	2.791	3.755	4.743	5.756	6.792	7.849	8.920	10.0
36	0.890	1.792	2.716	3.669	4.654	5.671	6.721	7.797	8.893	10.0
40	0.849	1.715	2.612	3.550	4.531	5.556	6.622	7.725	8.855	10.0
44	0.788	1.604	2.467	3.385	4.363	5.399	6.489	7.626	8.802	10.0
48	0.695	1.440	2.258	3.157	4.134	5.186	6.307	7.490	8.726	10.0
52	0.520	1.174	1.949	2.836	3.822	4.900	6.062	7.301	8.615	10.0

Zona del borde de bobina: posición radial x desde el borde del cobre  
ang(o) \ posición x -->

ang(o)	posición radial x desde el borde del cobre (r=ro+x)									
0.0	0.520	1.174	1.949	2.836	3.822	4.900	6.062	7.301	8.615	10.0
9.0	0.471	1.075	1.800	2.639	3.586	4.637	5.793	7.059	8.448	10.0
18.0	0.438	1.007	1.696	2.500	3.417	4.449	5.601	6.890	8.339	10.0
27.0	0.418	0.963	1.627	2.408	3.304	4.322	5.473	6.777	8.268	10.0
36.0	0.407	0.938	1.588	2.354	3.239	4.249	5.399	6.712	8.227	10.0
45.0	0.404	0.930	1.575	2.337	3.218	4.225	5.375	6.691	8.213	10.0



**Fig. 3.9. - Equipotenciales en el borde de la sección del aislamiento de una bobina de AT.**  
**Radio del borde: 10% del espesor del aislamiento.**  
**Diferencia entre Equipotenciales: 10% de la tensión aplicada.**

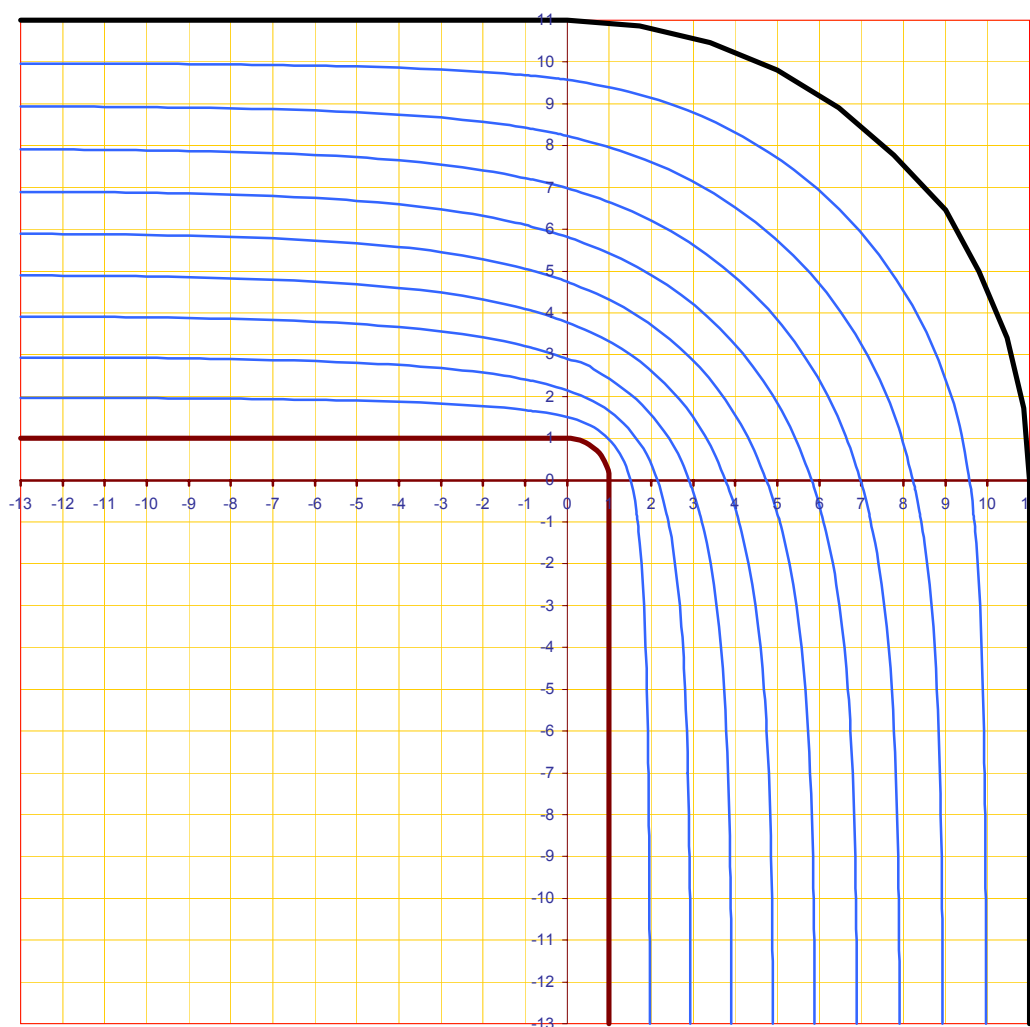


Tabla 3.4

<<<=====Programa Equipt.bas=====>>>

Radio del borde : 20 % del espesor del aislamiento.

Espesor del aislamiento: 10 unidades.

Potencial aplicado : 10 unidades.

Numero de iteraciones : 3200

1.- Valores, calculados en primera aproximación, de los potenciales en los puntos Z(i,j) de la malla de 68 filas X 201 columnas

col.:0	20	40	60	80	100	120	140	160	180	200	
fila \	Potencial en los puntos (j,k)										
0	10.0	9.000	8.000	7.000	6.000	5.000	4.000	3.000	2.000	1.000	0.00
4	10.0	8.915	7.865	6.845	5.843	4.852	3.869	2.893	1.924	0.960	0.00
8	10.0	8.896	7.813	6.764	5.747	4.755	3.781	2.821	1.873	0.933	0.00
12	10.0	8.880	7.784	6.721	5.693	4.696	3.724	2.772	1.837	0.915	0.00
16	10.0	8.860	7.752	6.682	5.650	4.653	3.683	2.738	1.812	0.901	0.00
20	10.0	8.836	7.712	6.636	5.603	4.607	3.643	2.705	1.788	0.889	0.00
24	10.0	8.804	7.664	6.580	5.546	4.554	3.597	2.668	1.762	0.875	0.00
28	10.0	8.764	7.603	6.512	5.478	4.491	3.542	2.624	1.731	0.859	0.00
32	10.0	8.710	7.526	6.427	5.394	4.415	3.477	2.572	1.695	0.840	0.00
36	10.0	8.636	7.427	6.322	5.293	4.323	3.399	2.511	1.652	0.817	0.00
40	10.0	8.535	7.299	6.190	5.169	4.213	3.307	2.439	1.601	0.790	0.00
44	10.0	8.392	7.131	6.025	5.017	4.080	3.196	2.352	1.541	0.759	0.00
48	10.0	8.186	6.912	5.817	4.831	3.919	3.063	2.249	1.469	0.720	0.00
52	10.0	7.890	6.628	5.560	4.605	3.726	2.905	2.127	1.384	0.675	0.00

Zona del borde de bobina (Zona Coaxial)

ang(o) \	Potencial en los puntos (j,ang(k))										
0	10.0	7.890	6.628	5.560	4.605	3.726	2.905	2.127	1.384	0.675	0.00
15	10.0	7.628	6.334	5.239	4.268	3.391	2.590	1.857	1.184	0.567	0.00
30	10.0	7.477	6.174	5.077	4.113	3.250	2.472	1.766	1.124	0.538	0.00
45	10.0	7.428	6.123	5.027	4.066	3.209	2.438	1.741	1.107	0.530	0.00

2.- Relajación:/ Iteración No: 3100

col.:0	20	40	60	80	100	120	140	160	180	200	
fila \	Potencial en los puntos (j,k)										
0	10.0	8.988	7.977	6.969	5.963	4.961	3.963	2.969	1.977	0.988	0.00
4	10.0	8.987	7.976	6.967	5.961	4.960	3.962	2.967	1.976	0.988	0.00
8	10.0	8.986	7.973	6.963	5.956	4.954	3.957	2.963	1.973	0.986	0.00
12	10.0	8.983	7.967	6.955	5.948	4.945	3.948	2.956	1.968	0.983	0.00
16	10.0	8.978	7.959	6.944	5.934	4.931	3.935	2.945	1.960	0.979	0.00
20	10.0	8.972	7.946	6.926	5.914	4.910	3.916	2.929	1.948	0.973	0.00
24	10.0	8.962	7.928	6.902	5.886	4.882	3.889	2.906	1.932	0.965	0.00
28	10.0	8.948	7.902	6.868	5.847	4.842	3.852	2.876	1.911	0.953	0.00
32	10.0	8.928	7.866	6.819	5.792	4.787	3.802	2.834	1.881	0.938	0.00
36	10.0	8.900	7.813	6.751	5.717	4.712	3.734	2.779	1.842	0.918	0.00
40	10.0	8.857	7.737	6.654	5.612	4.611	3.644	2.706	1.791	0.891	0.00
44	10.0	8.789	7.621	6.515	5.469	4.475	3.525	2.610	1.724	0.857	0.00
48	10.0	8.672	7.442	6.315	5.273	4.296	3.372	2.488	1.637	0.811	0.00
52	10.0	8.440	7.157	6.033	5.013	4.067	3.178	2.333	1.526	0.750	0.00

Zona del borde de bobina:

ang(o) \	Potencial en los puntos (j,ang(k))										
0	10.0	8.440	7.157	6.033	5.013	4.067	3.178	2.333	1.526	0.750	0.00
9	10.0	8.305	6.963	5.807	4.772	3.828	2.953	2.138	1.375	0.663	0.00
18	10.0	8.207	6.819	5.641	4.600	3.661	2.804	2.015	1.288	0.618	0.00
27	10.0	8.141	6.721	5.529	4.485	3.553	2.709	1.940	1.237	0.592	0.00
36	10.0	8.103	6.664	5.464	4.420	3.492	2.657	1.900	1.210	0.579	0.00
45	10.0	8.090	6.646	5.443	4.399	3.472	2.640	1.887	1.201	0.575	0.00

3.- Relajación:/ Iteración No: 3200

col.:0	20	40	60	80	100	120	140	160	180	200	
fila \	Potencial en los puntos (j,k)										
0	10.0	8.988	7.977	6.969	5.963	4.961	3.963	2.969	1.977	0.988	0.00
4	10.0	8.987	7.976	6.967	5.962	4.960	3.962	2.968	1.976	0.988	0.00
8	10.0	8.986	7.973	6.963	5.957	4.955	3.957	2.963	1.974	0.986	0.00
12	10.0	8.983	7.968	6.955	5.948	4.945	3.948	2.956	1.968	0.983	0.00
16	10.0	8.978	7.959	6.944	5.934	4.931	3.935	2.945	1.960	0.979	0.00
20	10.0	8.972	7.946	6.927	5.914	4.911	3.916	2.929	1.949	0.973	0.00
24	10.0	8.962	7.928	6.902	5.886	4.882	3.889	2.906	1.933	0.965	0.00
28	10.0	8.948	7.903	6.868	5.847	4.842	3.852	2.876	1.911	0.953	0.00
32	10.0	8.929	7.866	6.819	5.793	4.787	3.802	2.834	1.881	0.938	0.00
36	10.0	8.900	7.814	6.751	5.717	4.712	3.734	2.779	1.842	0.918	0.00
40	10.0	8.857	7.737	6.654	5.613	4.611	3.644	2.706	1.791	0.891	0.00
44	10.0	8.789	7.621	6.515	5.469	4.475	3.525	2.611	1.724	0.857	0.00
48	10.0	8.672	7.442	6.316	5.273	4.297	3.372	2.488	1.637	0.811	0.00
52	10.0	8.440	7.158	6.034	5.013	4.067	3.178	2.334	1.526	0.750	0.00

Zona del borde de bobina:

ang(o) \	Potencial en los puntos (j,ang(k))										
0	10.0	8.440	7.158	6.034	5.013	4.067	3.178	2.334	1.526	0.750	0.00
9	10.0	8.305	6.963	5.807	4.773	3.828	2.953	2.138	1.376	0.663	0.00
18	10.0	8.207	6.819	5.641	4.601	3.661	2.804	2.016	1.289	0.618	0.00
27	10.0	8.141	6.722	5.529	4.486	3.553	2.709	1.941	1.237	0.592	0.00
36	10.0	8.103	6.665	5.465	4.420	3.492	2.657	1.900	1.210	0.579	0.00
45	10.0	8.090	6.646	5.443	4.399	3.473	2.640	1.887	1.201	0.575	0.00

4.- Resultado:

Posición x (desde el cobre), de las Equipotenciales vistas en % de la tensión aplicada  
 Espesor del aislamiento:10 unidades.  
 Radio del borde: 20 % del espesor del aislamiento

Pos\Eq.	90%	80%	70%	60%	50%	40%	30%	20%	10%	0%
0	0.988	1.977	2.968	3.963	4.961	5.962	6.968	7.977	8.987	10.0
4	0.987	1.976	2.967	3.961	4.959	5.961	6.967	7.976	8.987	10.0
8	0.986	1.972	2.963	3.956	4.954	5.956	6.963	7.973	8.985	10.0
12	0.983	1.967	2.955	3.947	4.945	5.947	6.955	7.967	8.983	10.0
16	0.978	1.959	2.944	3.934	4.931	5.934	6.944	7.959	8.978	10.0
20	0.972	1.947	2.927	3.914	4.910	5.914	6.927	7.947	8.972	10.0
24	0.963	1.929	2.903	3.887	4.881	5.887	6.904	7.930	8.963	10.0
28	0.950	1.906	2.871	3.848	4.841	5.849	6.871	7.906	8.951	10.0
32	0.933	1.872	2.825	3.795	4.786	5.796	6.827	7.874	8.934	10.0
36	0.908	1.826	2.763	3.723	4.710	5.725	6.766	7.830	8.910	10.0
40	0.874	1.762	2.676	3.623	4.607	5.627	6.683	7.769	8.878	10.0
44	0.824	1.670	2.554	3.485	4.465	5.494	6.569	7.685	8.833	10.0
48	0.747	1.535	2.382	3.295	4.273	5.315	6.415	7.569	8.768	10.0
52	0.613	1.325	2.133	3.031	4.013	5.073	6.206	7.407	8.672	10.0

Zona del borde de bobina: posición radial x desde el borde del cobre

ang(o) \	posición x --> (r=ro+x)									
0.0	0.613	1.325	2.133	3.031	4.013	5.073	6.206	7.407	8.672	10.0
9.0	0.552	1.211	1.969	2.824	3.771	4.811	5.944	7.176	8.517	10.0
18.0	0.516	1.137	1.858	2.680	3.602	4.628	5.763	7.020	8.419	10.0
27.0	0.494	1.090	1.787	2.587	3.491	4.507	5.644	6.919	8.357	10.0
36.0	0.483	1.064	1.748	2.534	3.429	4.439	5.576	6.861	8.322	10.0
45.0	0.479	1.056	1.735	2.517	3.408	4.416	5.554	6.843	8.310	10.0

**Fig. 3.10. -Equipotenciales en el borde de la sección del aislamiento de una bobina de AT.  
Radio del borde: 20% del espesor del aislamiento.  
Diferencia entre Equipotenciales: 10% de la tensión aplicada.**

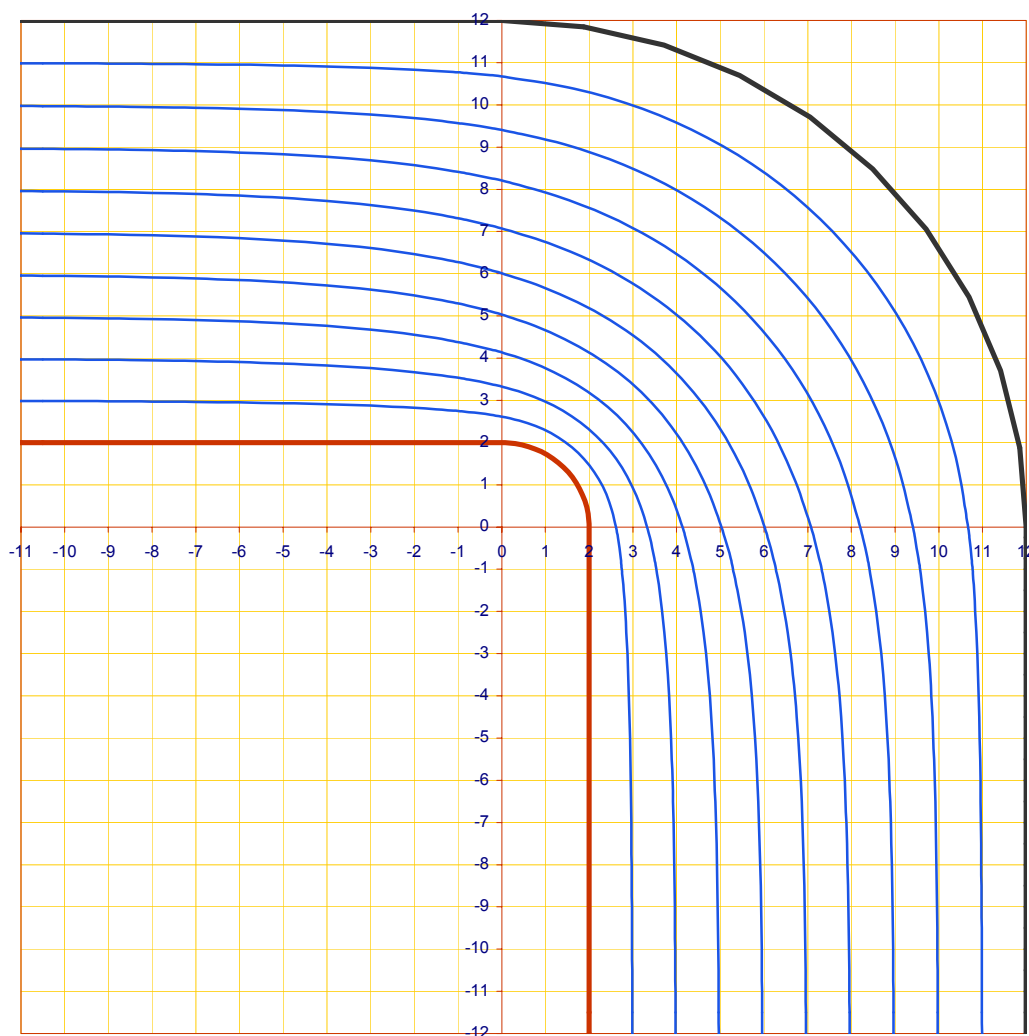


Tabla 3.5

<<<=====Programa Equipt.bas=====>>>

Radio del borde : 30 % del espesor del aislamiento.

Espesor del aislamiento: 10 unidades.

Potencial aplicado : 10 unidades.

Numero de iteraciones : 3200

1.- Valores, calculados en primera aproximación, de los potenciales en los puntos Z(i,j) de la malla de 68 filas X 201 columnas

col.:0	20	40	60	80	100	120	140	160	180	200	
fila \	Potencial en los puntos (j,k)										
0	10.0	9.000	8.000	7.000	6.000	5.000	4.000	3.000	2.000	1.000	0.00
4	10.0	8.907	7.857	6.840	5.840	4.851	3.869	2.893	1.924	0.961	0.00
8	10.0	8.888	7.806	6.759	5.744	4.753	3.780	2.821	1.873	0.934	0.00
12	10.0	8.873	7.778	6.719	5.693	4.698	3.726	2.774	1.839	0.916	0.00
16	10.0	8.853	7.747	6.682	5.653	4.657	3.688	2.742	1.815	0.903	0.00
20	10.0	8.829	7.710	6.638	5.609	4.615	3.650	2.711	1.793	0.891	0.00
24	10.0	8.799	7.664	6.586	5.556	4.565	3.607	2.677	1.768	0.878	0.00
28	10.0	8.761	7.608	6.523	5.493	4.507	3.557	2.636	1.740	0.863	0.00
32	10.0	8.711	7.537	6.445	5.416	4.437	3.497	2.588	1.706	0.845	0.00
36	10.0	8.646	7.448	6.350	5.324	4.354	3.426	2.532	1.667	0.825	0.00
40	10.0	8.557	7.333	6.231	5.212	4.253	3.341	2.466	1.620	0.800	0.00
44	10.0	8.434	7.185	6.084	5.075	4.133	3.240	2.387	1.565	0.770	0.00
48	10.0	8.261	6.993	5.899	4.908	3.988	3.120	2.293	1.499	0.735	0.00
52	10.0	8.013	6.744	5.670	4.705	3.814	2.977	2.182	1.421	0.693	0.00

Zona del borde de bobina (Sector coaxial)

ang(o) \	Potencial en los puntos (j,ang(k))										
0	10.0	8.013	6.744	5.670	4.705	3.814	2.977	2.182	1.421	0.693	0.00
15	10.0	7.732	6.423	5.324	4.348	3.463	2.653	1.907	1.220	0.586	0.00
30	10.0	7.578	6.258	5.158	4.192	3.324	2.537	1.819	1.162	0.558	0.00
45	10.0	7.528	6.206	5.108	4.145	3.283	2.504	1.795	1.146	0.550	0.00

2.- Relajación:/ Iteración No: 3100

col.:0	20	40	60	80	100	120	140	160	180	200	
fila \	Potencial en los puntos (j,k)										
0	10.0	8.984	7.969	6.958	5.951	4.948	3.951	2.958	1.970	0.984	0.00
4	10.0	8.983	7.968	6.957	5.949	4.947	3.949	2.957	1.969	0.983	0.00
8	10.0	8.982	7.966	6.953	5.945	4.942	3.945	2.953	1.966	0.982	0.00
12	10.0	8.979	7.961	6.946	5.937	4.934	3.937	2.947	1.961	0.980	0.00
16	10.0	8.975	7.953	6.936	5.925	4.921	3.925	2.937	1.954	0.976	0.00
20	10.0	8.969	7.942	6.921	5.907	4.903	3.909	2.922	1.944	0.970	0.00
24	10.0	8.961	7.926	6.899	5.883	4.878	3.885	2.903	1.930	0.963	0.00
28	10.0	8.949	7.904	6.870	5.849	4.843	3.852	2.876	1.910	0.953	0.00
32	10.0	8.932	7.873	6.828	5.801	4.795	3.808	2.839	1.884	0.939	0.00
36	10.0	8.908	7.828	6.769	5.736	4.730	3.749	2.790	1.850	0.921	0.00
40	10.0	8.872	7.763	6.686	5.646	4.641	3.670	2.726	1.804	0.898	0.00
44	10.0	8.816	7.667	6.568	5.522	4.523	3.565	2.641	1.744	0.867	0.00
48	10.0	8.723	7.519	6.400	5.353	4.366	3.428	2.531	1.666	0.826	0.00
52	10.0	8.545	7.287	6.161	5.127	4.163	3.255	2.391	1.564	0.769	0.00

Zona del borde de bobina:

ang(o) \	Potencial en los puntos (j,ang(k))										
0	10.0	8.545	7.287	6.161	5.127	4.163	3.255	2.391	1.564	0.769	0.00
9	10.0	8.412	7.093	5.933	4.885	3.923	3.030	2.196	1.414	0.683	0.00
18	10.0	8.322	6.955	5.772	4.717	3.761	2.885	2.077	1.331	0.640	0.00
27	10.0	8.264	6.864	5.666	4.609	3.658	2.795	2.006	1.282	0.616	0.00
36	10.0	8.231	6.813	5.607	4.548	3.601	2.746	1.968	1.257	0.603	0.00
45	10.0	8.220	6.796	5.587	4.528	3.583	2.731	1.956	1.249	0.599	0.00

## 3.- Relajación:/ Iteración No: 3200

col.:0	20	40	60	80	100	120	140	160	180	200	
fila \	Potencial en los puntos (j,k)										
0	10.0	8.984	7.970	6.958	5.951	4.949	3.951	2.959	1.970	0.984	0.00
4	10.0	8.984	7.969	6.957	5.950	4.947	3.950	2.957	1.969	0.984	0.00
8	10.0	8.982	7.966	6.953	5.945	4.943	3.945	2.954	1.966	0.982	0.00
12	10.0	8.979	7.961	6.947	5.937	4.934	3.938	2.947	1.962	0.980	0.00
16	10.0	8.975	7.953	6.936	5.925	4.922	3.926	2.937	1.954	0.976	0.00
20	10.0	8.970	7.942	6.921	5.908	4.904	3.909	2.923	1.944	0.971	0.00
24	10.0	8.961	7.927	6.900	5.883	4.879	3.885	2.903	1.930	0.963	0.00
28	10.0	8.949	7.904	6.870	5.849	4.844	3.853	2.876	1.911	0.953	0.00
32	10.0	8.932	7.873	6.828	5.802	4.796	3.809	2.840	1.885	0.940	0.00
36	10.0	8.908	7.828	6.770	5.737	4.730	3.749	2.791	1.850	0.922	0.00
40	10.0	8.872	7.764	6.687	5.646	4.642	3.670	2.726	1.804	0.898	0.00
44	10.0	8.816	7.667	6.569	5.522	4.523	3.565	2.641	1.744	0.867	0.00
48	10.0	8.723	7.520	6.400	5.354	4.367	3.429	2.531	1.666	0.826	0.00
52	10.0	8.545	7.288	6.161	5.128	4.164	3.255	2.391	1.565	0.769	0.00

## Zona del borde de bobina:

ang(o) \	Potencial en los puntos (j,ang(k))										
0	10.0	8.545	7.288	6.161	5.128	4.164	3.255	2.391	1.565	0.769	0.00
9	10.0	8.413	7.093	5.934	4.886	3.923	3.030	2.196	1.415	0.683	0.00
18	10.0	8.322	6.956	5.773	4.718	3.761	2.885	2.078	1.331	0.640	0.00
27	10.0	8.264	6.865	5.667	4.609	3.659	2.796	2.007	1.283	0.616	0.00
36	10.0	8.231	6.814	5.607	4.548	3.602	2.747	1.969	1.257	0.603	0.00
45	10.0	8.220	6.797	5.588	4.529	3.584	2.731	1.957	1.249	0.599	0.00

## 4.- Resultado:

Posición x (desde el cobre), de las Equipotenciales  
vistas en % de la tensión aplicada

Espesor del aislamiento:10 unidades base

Radio del borde: 30 % del espesor del aislamiento

Pos\Eq.	90%	80%	70%	60%	50%	40%	30%	20%	10%	0%
0	0.984	1.969	2.958	3.950	4.948	5.950	6.957	7.969	8.983	10.0
4	0.983	1.968	2.957	3.949	4.947	5.949	6.956	7.968	8.983	10.0
8	0.982	1.965	2.953	3.945	4.942	5.944	6.952	7.965	8.981	10.0
12	0.979	1.961	2.946	3.937	4.934	5.937	6.946	7.960	8.979	10.0
16	0.975	1.953	2.936	3.925	4.921	5.925	6.936	7.953	8.975	10.0
20	0.970	1.943	2.922	3.908	4.903	5.907	6.921	7.942	8.969	10.0
24	0.962	1.928	2.901	3.884	4.878	5.883	6.900	7.927	8.961	10.0
28	0.951	1.907	2.873	3.851	4.843	5.850	6.872	7.906	8.950	10.0
32	0.936	1.879	2.834	3.805	4.795	5.804	6.833	7.878	8.935	10.0
36	0.915	1.839	2.780	3.742	4.729	5.741	6.779	7.839	8.915	10.0
40	0.886	1.784	2.705	3.655	4.639	5.656	6.706	7.785	8.886	10.0
44	0.843	1.706	2.601	3.537	4.517	5.541	6.607	7.711	8.846	10.0
48	0.779	1.592	2.455	3.374	4.351	5.385	6.472	7.609	8.790	10.0
52	0.669	1.418	2.246	3.150	4.128	5.176	6.290	7.467	8.705	10.0

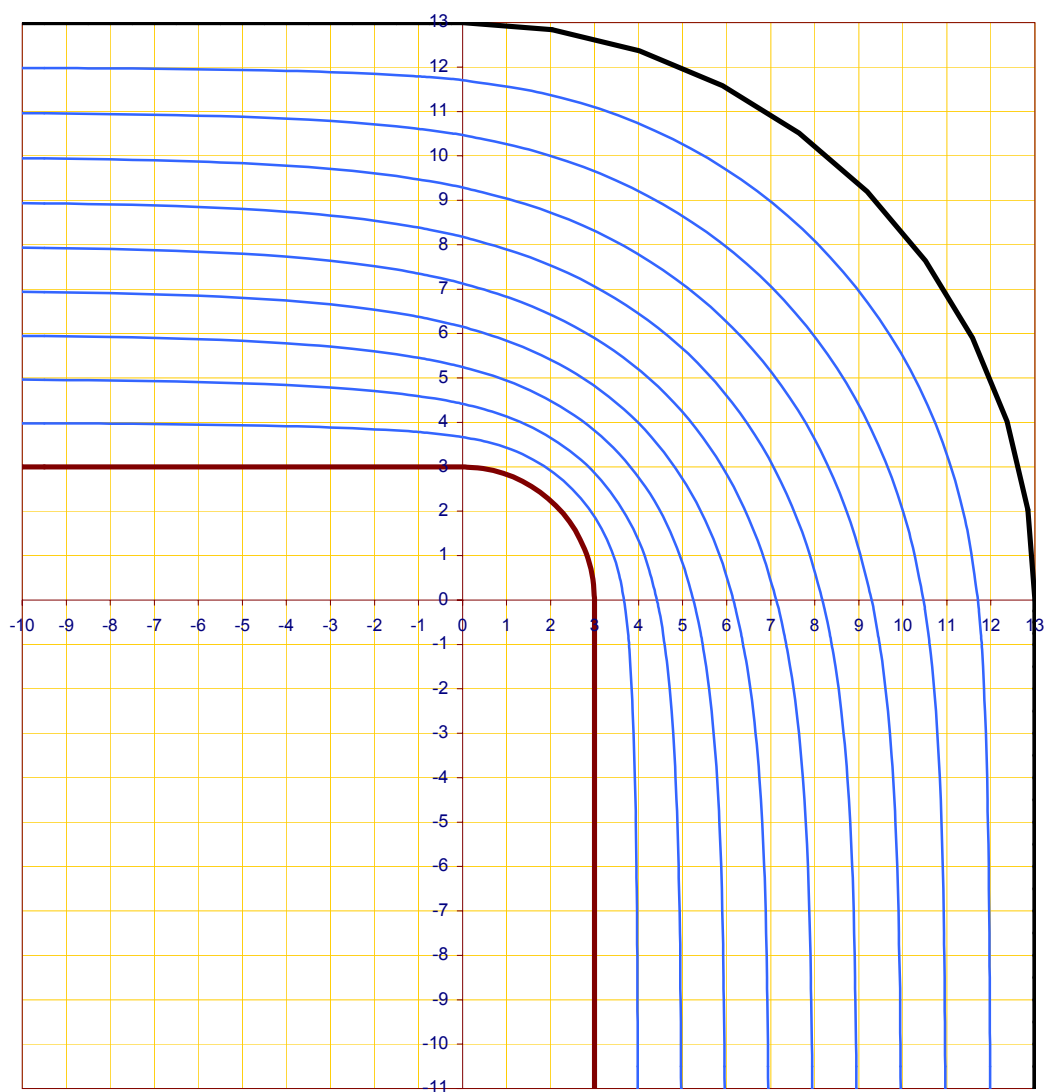
## Zona del borde de bobina: posición radial x desde el borde del cobre

ang(o) \	posición x --> (r=ro+x)									
0.0	0.669	1.418	2.246	3.150	4.128	5.176	6.290	7.467	8.705	10.0
9.0	0.603	1.297	2.076	2.939	3.886	4.917	6.034	7.244	8.557	10.0
18.0	0.566	1.221	1.964	2.797	3.722	4.741	5.863	7.100	8.468	10.0
27.0	0.544	1.175	1.895	2.708	3.617	4.629	5.754	7.008	8.413	10.0
36.0	0.533	1.150	1.857	2.658	3.558	4.566	5.693	6.957	8.382	10.0
<b>45.0</b>	<b>0.529</b>	<b>1.143</b>	<b>1.845</b>	<b>2.642</b>	<b>3.539</b>	<b>4.546</b>	<b>5.673</b>	<b>6.941</b>	<b>8.372</b>	<b>10.0</b>

**Fig. 3.11. -Equipotenciales en el borde de la sección del aislamiento de una bobina de AT.**

**Radio del borde: 30% del espesor del aislamiento.**

**Diferencia entre Equipotenciales: 10% de la tensión aplicada.**



**Tabla 3.6**

<<<=====Programa Equipt.bas=====>>>

Radio del borde : 40% del espesor del aislamiento.  
 Espesor del aislamiento: 10 unidades.  
 Potencial aplicado : 10 unidades.  
 Numero de iteraciones : 3200

1.- Valores, calculados en primera aproximación, de los potenciales en los puntos Z(i,j) de la malla de 68 filas X 201 columnas

col.:0	20	40	60	80	100	120	140	160	180	200	
fila \	Potencial en los puntos (j,k)										
0	10.0	9.000	8.000	7.000	6.000	5.000	4.000	3.000	2.000	1.000	0.00
4	10.0	8.903	7.853	6.837	5.838	4.850	3.868	2.893	1.925	0.961	0.00
8	10.0	8.886	7.804	6.758	5.744	4.754	3.780	2.821	1.874	0.934	0.00
12	10.0	8.870	7.778	6.721	5.697	4.702	3.730	2.777	1.841	0.917	0.00
16	10.0	8.852	7.749	6.686	5.660	4.664	3.695	2.748	1.819	0.905	0.00
20	10.0	8.830	7.714	6.646	5.619	4.625	3.660	2.719	1.799	0.894	0.00
24	10.0	8.802	7.672	6.598	5.570	4.579	3.620	2.687	1.776	0.882	0.00
28	10.0	8.767	7.621	6.540	5.512	4.525	3.573	2.649	1.749	0.868	0.00
32	10.0	8.723	7.557	6.470	5.442	4.462	3.519	2.606	1.718	0.852	0.00
36	10.0	8.665	7.477	6.384	5.359	4.386	3.454	2.554	1.682	0.832	0.00
40	10.0	8.589	7.377	6.279	5.258	4.296	3.377	2.493	1.639	0.809	0.00
44	10.0	8.486	7.248	6.148	5.136	4.187	3.286	2.421	1.588	0.782	0.00
48	10.0	8.344	7.082	5.985	4.987	4.057	3.177	2.336	1.528	0.750	0.00
52	10.0	8.144	6.867	5.783	4.806	3.900	3.048	2.235	1.456	0.711	0.00

Zona del borde de bobina (Sector coaxial)

ang(o) \	Potencial en los puntos (j,ang(k))										
0	10.0	8.144	6.867	5.783	4.806	3.900	3.048	2.235	1.456	0.711	0.00
15	10.0	7.881	6.545	5.430	4.441	3.544	2.721	1.961	1.258	0.606	0.00
30	10.0	7.757	6.394	5.275	4.294	3.413	2.612	1.879	1.203	0.579	0.00
45	10.0	7.721	6.349	5.229	4.252	3.376	2.582	1.856	1.189	0.572	0.00

2.- Relajación:/ Iteración No: 3000

col.:0	20	40	60	80	100	120	140	160	180	200	
fila \	Potencial en los puntos (j,k)										
0	10.0	8.987	7.976	6.966	5.961	4.959	3.961	2.967	1.976	0.987	0.00
4	10.0	8.987	7.975	6.965	5.960	4.957	3.959	2.966	1.975	0.987	0.00
8	10.0	8.986	7.973	6.962	5.956	4.953	3.955	2.962	1.973	0.986	0.00
12	10.0	8.983	7.968	6.956	5.949	4.946	3.949	2.957	1.968	0.983	0.00
16	10.0	8.980	7.961	6.947	5.938	4.934	3.938	2.947	1.962	0.980	0.00
20	10.0	8.974	7.951	6.933	5.922	4.919	3.923	2.935	1.953	0.975	0.00
24	10.0	8.967	7.938	6.915	5.900	4.896	3.902	2.917	1.940	0.969	0.00
28	10.0	8.957	7.918	6.888	5.870	4.865	3.873	2.893	1.923	0.960	0.00
32	10.0	8.942	7.891	6.852	5.829	4.823	3.834	2.861	1.900	0.948	0.00
36	10.0	8.921	7.852	6.801	5.772	4.766	3.782	2.817	1.869	0.932	0.00
40	10.0	8.890	7.797	6.729	5.693	4.687	3.711	2.759	1.828	0.910	0.00
44	10.0	8.843	7.714	6.627	5.584	4.582	3.617	2.683	1.773	0.882	0.00
48	10.0	8.766	7.589	6.482	5.436	4.443	3.495	2.584	1.702	0.845	0.00
52	10.0	8.623	7.395	6.275	5.237	4.262	3.338	2.456	1.609	0.793	0.00

Zona del borde de bobina:

ang(o) \	Potencial en los puntos (j,ang(k))										
0	10.0	8.623	7.395	6.275	5.237	4.262	3.338	2.456	1.609	0.793	0.00
9	10.0	8.495	7.204	6.050	4.997	4.023	3.114	2.261	1.460	0.706	0.00
18	10.0	8.413	7.075	5.897	4.836	3.867	2.975	2.148	1.380	0.665	0.00
27	10.0	8.362	6.993	5.800	4.736	3.772	2.891	2.081	1.335	0.643	0.00
36	10.0	8.334	6.948	5.747	4.680	3.720	2.847	2.047	1.311	0.631	0.00
45	10.0	8.325	6.934	5.730	4.663	3.703	2.833	2.036	1.304	0.628	0.00



## 3.- Relajación:/ Iteración No: 3200

col.:0	20	40	60	80	100	120	140	160	180	200	
fila \	Potencial en los puntos (j,k)										
0	10.0	8.987	7.976	6.967	5.961	4.959	3.961	2.967	1.976	0.987	0.00
4	10.0	8.987	7.975	6.966	5.960	4.957	3.960	2.966	1.975	0.987	0.00
8	10.0	8.986	7.973	6.962	5.956	4.953	3.956	2.962	1.973	0.986	0.00
12	10.0	8.983	7.968	6.956	5.949	4.946	3.949	2.957	1.969	0.983	0.00
16	10.0	8.980	7.961	6.947	5.938	4.935	3.938	2.948	1.962	0.980	0.00
20	10.0	8.975	7.952	6.934	5.922	4.919	3.923	2.935	1.953	0.975	0.00
24	10.0	8.967	7.938	6.915	5.901	4.896	3.902	2.917	1.940	0.969	0.00
28	10.0	8.957	7.918	6.888	5.870	4.865	3.873	2.893	1.923	0.960	0.00
32	10.0	8.942	7.891	6.852	5.829	4.823	3.834	2.861	1.900	0.948	0.00
36	10.0	8.921	7.852	6.801	5.772	4.766	3.782	2.817	1.869	0.932	0.00
40	10.0	8.891	7.797	6.729	5.693	4.688	3.711	2.760	1.828	0.910	0.00
44	10.0	8.843	7.714	6.627	5.584	4.583	3.618	2.683	1.774	0.882	0.00
48	10.0	8.766	7.590	6.482	5.436	4.443	3.495	2.584	1.703	0.845	0.00
52	10.0	8.623	7.395	6.276	5.237	4.262	3.338	2.456	1.609	0.793	0.00

## Zona del borde de bobina:

ang(o) \	Potencial en los puntos (j,ang(k))										
0	10.0	8.623	7.395	6.276	5.237	4.262	3.338	2.456	1.609	0.793	0.00
9	10.0	8.495	7.204	6.050	4.997	4.023	3.114	2.262	1.460	0.706	0.00
18	10.0	8.413	7.075	5.898	4.837	3.868	2.975	2.148	1.380	0.665	0.00
27	10.0	8.362	6.993	5.800	4.736	3.772	2.891	2.082	1.335	0.643	0.00
36	10.0	8.334	6.948	5.747	4.681	3.720	2.847	2.047	1.311	0.631	0.00
45	10.0	8.325	6.934	5.730	4.663	3.704	2.833	2.037	1.304	0.628	0.00

## 4.- Resultado:

Posición x (desde el cobre), de las Equipotenciales  
vistas en % de la tensión aplicada

Espesor del aislamiento: 10 unidades.

Radio del borde: 40 % del espesor del aislamiento

Pos\Eq.	90%	80%	70%	60%	50%	40%	30%	20%	10%	0%
0	0.987	1.975	2.966	3.960	4.958	5.960	6.966	7.975	8.987	10.0
4	0.986	1.974	2.965	3.959	4.957	5.959	6.965	7.974	8.986	10.0
8	0.985	1.972	2.962	3.955	4.953	5.955	6.962	7.972	8.985	10.0
12	0.983	1.968	2.956	3.948	4.945	5.948	6.956	7.968	8.983	10.0
16	0.980	1.961	2.947	3.937	4.934	5.937	6.946	7.961	8.979	10.0
20	0.975	1.952	2.934	3.922	4.918	5.922	6.933	7.951	8.974	10.0
24	0.968	1.938	2.916	3.901	4.896	5.900	6.915	7.938	8.967	10.0
28	0.958	1.920	2.890	3.871	4.865	5.871	6.890	7.920	8.957	10.0
32	0.945	1.895	2.856	3.831	4.822	5.831	6.856	7.895	8.944	10.0
36	0.926	1.860	2.809	3.776	4.765	5.776	6.809	7.860	8.926	10.0
40	0.900	1.812	2.743	3.700	4.685	5.701	6.744	7.813	8.901	10.0
44	0.863	1.743	2.652	3.595	4.578	5.599	6.657	7.748	8.866	10.0
48	0.807	1.644	2.524	3.453	4.433	5.461	6.538	7.658	8.816	10.0
52	0.714	1.494	2.343	3.258	4.237	5.278	6.377	7.532	8.742	10.0

## Zona del borde de bobina: posición radial x desde el borde del cobre

ang(o) \	posición x --> (r=ro+x)									
0.0	0.714	1.494	2.343	3.258	4.237	5.278	6.377	7.532	8.742	10.0
9.0	0.644	1.368	2.169	3.045	3.996	5.024	6.129	7.319	8.602	10.0
18.0	0.607	1.293	2.060	2.908	3.839	4.858	5.970	7.186	8.521	10.0
27.0	0.586	1.250	1.994	2.823	3.741	4.754	5.871	7.105	8.473	10.0
36.0	0.575	1.227	1.959	2.778	3.688	4.698	5.817	7.061	8.447	10.0
<b>45.0</b>	<b>0.571</b>	<b>1.219</b>	<b>1.948</b>	<b>2.764</b>	<b>3.671</b>	<b>4.680</b>	<b>5.800</b>	<b>7.047</b>	<b>8.439</b>	<b>10.0</b>

**Fig. 3.12. -Equipotenciales en el borde de la sección del aislamiento una bobina de AT.**

**Radio del borde: 40% del espesor del aislamiento.  
Diferencia entre Equipotenciales: 10% de la tensión aplicada.**

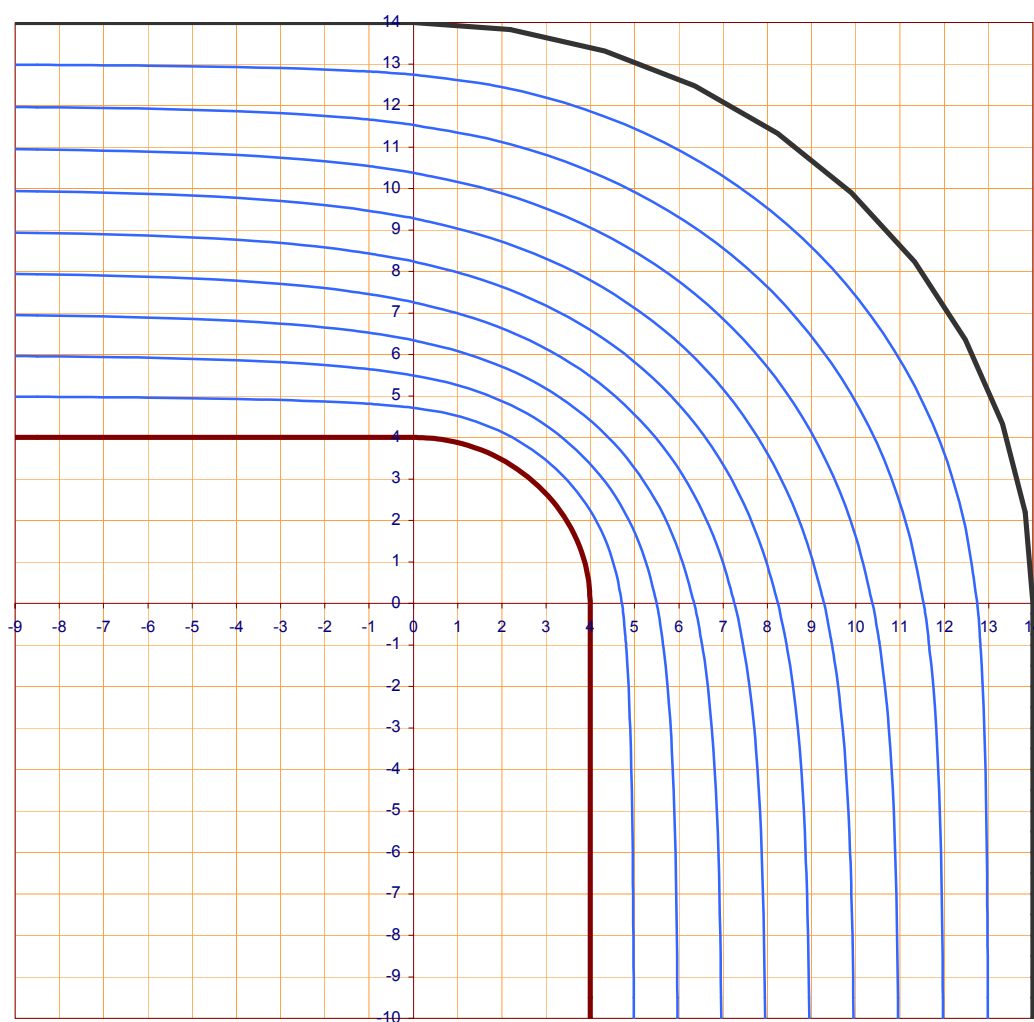


Tabla 3.7

<<<=====Programa Equipt.bas=====>>>

Radio del borde : 50 % del espesor del aislamiento.

Espesor del aislamiento: 10 unidades.

Potencial aplicado : 10 unidades.

Numero de iteraciones : 3200

1.- Valores, calculados en primera aproximación, de los potenciales en los puntos Z(i,j) de la malla de 68 filas X 201 columnas

col.:0	20	40	60	80	100	120	140	160	180	200	
fila \	Potencial en los puntos (j,k)										
0	10.0	9.000	8.000	7.000	6.000	5.000	4.000	3.000	2.000	1.000	0.00
4	10.0	8.902	7.852	6.835	5.837	4.849	3.868	2.893	1.925	0.961	0.00
8	10.0	8.886	7.805	6.760	5.746	4.755	3.782	2.823	1.875	0.935	0.00
12	10.0	8.871	7.781	6.726	5.703	4.708	3.735	2.782	1.844	0.918	0.00
16	10.0	8.854	7.754	6.694	5.669	4.673	3.703	2.754	1.824	0.907	0.00
20	10.0	8.834	7.722	6.657	5.631	4.637	3.671	2.728	1.805	0.897	0.00
24	10.0	8.808	7.684	6.613	5.586	4.595	3.634	2.698	1.783	0.886	0.00
28	10.0	8.777	7.637	6.560	5.533	4.546	3.591	2.663	1.759	0.873	0.00
32	10.0	8.738	7.580	6.497	5.470	4.487	3.541	2.623	1.730	0.858	0.00
36	10.0	8.688	7.510	6.420	5.395	4.419	3.481	2.576	1.696	0.840	0.00
40	10.0	8.623	7.422	6.327	5.305	4.337	3.412	2.520	1.657	0.819	0.00
44	10.0	8.538	7.311	6.212	5.196	4.240	3.329	2.454	1.610	0.794	0.00
48	10.0	8.422	7.169	6.070	5.064	4.123	3.231	2.377	1.555	0.764	0.00
52	10.0	8.263	6.987	5.893	4.903	3.983	3.115	2.285	1.490	0.728	0.00

Zona del borde de bobina (Zona coaxial)

ang(o) \	Potencial en los puntos (j,ang(k))										
0	10.0	8.263	6.987	5.893	4.903	3.983	3.115	2.285	1.490	0.728	0.00
15	10.0	8.047	6.684	5.549	4.545	3.633	2.794	2.018	1.298	0.627	0.00
30	10.0	7.983	6.570	5.420	4.417	3.517	2.698	1.945	1.249	0.602	0.00
45	10.0	7.971	6.541	5.386	4.383	3.487	2.672	1.926	1.236	0.596	0.00

2.- Relajación:/ Iteración No: 3100

col.:0	20	40	60	80	100	120	140	160	180	200	
fila \	Potencial en los puntos (j,k)										
0	10.0	8.987	7.975	6.966	5.960	4.958	3.960	2.966	1.975	0.987	0.00
4	10.0	8.987	7.975	6.965	5.959	4.957	3.959	2.965	1.974	0.987	0.00
8	10.0	8.986	7.973	6.962	5.956	4.953	3.955	2.962	1.972	0.986	0.00
12	10.0	8.984	7.969	6.957	5.949	4.947	3.949	2.957	1.969	0.984	0.00
16	10.0	8.981	7.963	6.949	5.940	4.937	3.940	2.949	1.963	0.980	0.00
20	10.0	8.976	7.954	6.937	5.926	4.923	3.927	2.938	1.955	0.976	0.00
24	10.0	8.969	7.942	6.920	5.907	4.903	3.908	2.922	1.944	0.970	0.00
28	10.0	8.960	7.924	6.897	5.880	4.875	3.882	2.901	1.928	0.962	0.00
32	10.0	8.947	7.900	6.864	5.843	4.837	3.847	2.872	1.907	0.952	0.00
36	10.0	8.929	7.866	6.819	5.792	4.786	3.800	2.832	1.880	0.937	0.00
40	10.0	8.902	7.817	6.756	5.722	4.716	3.737	2.780	1.842	0.918	0.00
44	10.0	8.861	7.746	6.666	5.626	4.622	3.652	2.711	1.793	0.892	0.00
48	10.0	8.796	7.638	6.539	5.494	4.498	3.542	2.621	1.728	0.858	0.00
52	10.0	8.677	7.472	6.358	5.317	4.334	3.399	2.503	1.642	0.810	0.00

Zona del borde de bobina:

ang(o) \	Potencial en los puntos (j,ang(k))										
0	10.0	8.677	7.472	6.358	5.317	4.334	3.399	2.503	1.642	0.810	0.00
9	10.0	8.553	7.285	6.137	5.080	4.098	3.178	2.312	1.495	0.725	0.00
18	10.0	8.479	7.164	5.992	4.928	3.950	3.045	2.203	1.419	0.685	0.00
27	10.0	8.434	7.091	5.904	4.835	3.862	2.967	2.142	1.376	0.664	0.00
36	10.0	8.411	7.052	5.857	4.786	3.815	2.927	2.110	1.355	0.654	0.00
45	10.0	8.403	7.040	5.842	4.771	3.801	2.915	2.101	1.349	0.651	0.00

3.- Relajación:/ Iteración No: 3200

col.:0	20	40	60	80	100	120	140	160	180	200	
fila \	Potencial en los puntos (j,k)										
0	10.0	8.987	7.976	6.967	5.961	4.959	3.961	2.967	1.976	0.987	0.00
4	10.0	8.987	7.975	6.966	5.960	4.958	3.960	2.966	1.975	0.987	0.00
8	10.0	8.986	7.973	6.963	5.956	4.954	3.956	2.963	1.973	0.986	0.00
12	10.0	8.984	7.969	6.958	5.950	4.948	3.950	2.958	1.969	0.984	0.00
16	10.0	8.981	7.963	6.950	5.941	4.938	3.941	2.950	1.964	0.981	0.00
20	10.0	8.976	7.955	6.938	5.927	4.924	3.928	2.939	1.955	0.977	0.00
24	10.0	8.970	7.942	6.921	5.908	4.904	3.909	2.923	1.944	0.971	0.00
28	10.0	8.960	7.925	6.898	5.881	4.876	3.883	2.901	1.929	0.963	0.00
32	10.0	8.947	7.901	6.865	5.844	4.838	3.848	2.872	1.908	0.952	0.00
36	10.0	8.929	7.867	6.820	5.793	4.787	3.801	2.833	1.880	0.937	0.00
40	10.0	8.902	7.818	6.757	5.723	4.717	3.738	2.781	1.843	0.918	0.00
44	10.0	8.862	7.746	6.667	5.627	4.624	3.654	2.712	1.794	0.892	0.00
48	10.0	8.796	7.639	6.540	5.495	4.499	3.543	2.622	1.729	0.858	0.00
52	10.0	8.677	7.472	6.359	5.318	4.335	3.400	2.504	1.642	0.810	0.00

Zona del borde de bobina:

ang(o) \	Potencial en los puntos (j,ang(k))										
0	10.0	8.677	7.472	6.359	5.318	4.335	3.400	2.504	1.642	0.810	0.00
9	10.0	8.554	7.286	6.138	5.082	4.099	3.179	2.313	1.496	0.725	0.00
18	10.0	8.479	7.165	5.994	4.929	3.951	3.046	2.204	1.419	0.686	0.00
27	10.0	8.435	7.092	5.905	4.837	3.863	2.969	2.143	1.377	0.665	0.00
36	10.0	8.411	7.053	5.858	4.787	3.817	2.929	2.111	1.356	0.654	0.00
45	10.0	8.404	7.041	5.843	4.772	3.802	2.916	2.102	1.349	0.651	0.00

4.- Resultado:

Posición x (desde el cobre), de las Equipotenciales vistas en % de la tensión aplicada  
 Espesor del aislamiento:10 unidades.  
 Radio del borde: 50 % del espesor del aislamiento

Pos\Eq.	90%	80%	70%	60%	50%	40%	30%	20%	10%	0%
0	0.987	1.975	2.966	3.960	4.958	5.960	6.966	7.975	8.986	10.0
4	0.987	1.974	2.965	3.959	4.957	5.959	6.965	7.974	8.986	10.0
8	0.985	1.972	2.962	3.956	4.953	5.955	6.962	7.972	8.985	10.0
12	0.984	1.969	2.957	3.950	4.947	5.949	6.957	7.968	8.983	10.0
16	0.981	1.963	2.949	3.940	4.937	5.940	6.949	7.962	8.980	10.0
20	0.976	1.955	2.938	3.927	4.923	5.926	6.937	7.954	8.975	10.0
24	0.970	1.943	2.922	3.908	4.903	5.907	6.921	7.942	8.969	10.0
28	0.961	1.926	2.899	3.881	4.875	5.881	6.898	7.926	8.961	10.0
32	0.949	1.904	2.868	3.845	4.838	5.845	6.868	7.904	8.949	10.0
36	0.933	1.873	2.826	3.796	4.786	5.796	6.826	7.873	8.933	10.0
40	0.910	1.830	2.768	3.729	4.716	5.729	6.769	7.831	8.910	10.0
44	0.877	1.770	2.687	3.636	4.620	5.638	6.690	7.773	8.879	10.0
48	0.828	1.682	2.574	3.510	4.491	5.516	6.584	7.692	8.835	10.0
52	0.747	1.551	2.415	3.338	4.318	5.352	6.440	7.580	8.768	10.0

Zona del borde de bobina: posición radial x desde el borde del cobre

ang(o) \	posición x --> (r=ro+x)									
0.0	0.747	1.551	2.415	3.338	4.318	5.352	6.440	7.580	8.768	10.0
9.0	0.675	1.423	2.240	3.125	4.079	5.104	6.200	7.375	8.635	10.0
18.0	0.638	1.350	2.134	2.993	3.930	4.947	6.052	7.252	8.562	10.0
27.0	0.619	1.309	2.073	2.915	3.840	4.853	5.963	7.180	8.519	10.0
36.0	0.609	1.288	2.041	2.874	3.792	4.803	5.915	7.142	8.497	10.0
45.0	0.608	1.287	2.041	2.876	3.796	4.808	5.922	7.148	8.502	10.0

**Fig. 3.13. - Equipotenciales en el borde de la sección del aislamiento de una bobina de AT.  
Radio del borde: 50% del espesor del aislamiento.  
Diferencia entre Equipotenciales: 10% de la tensión aplicada.**

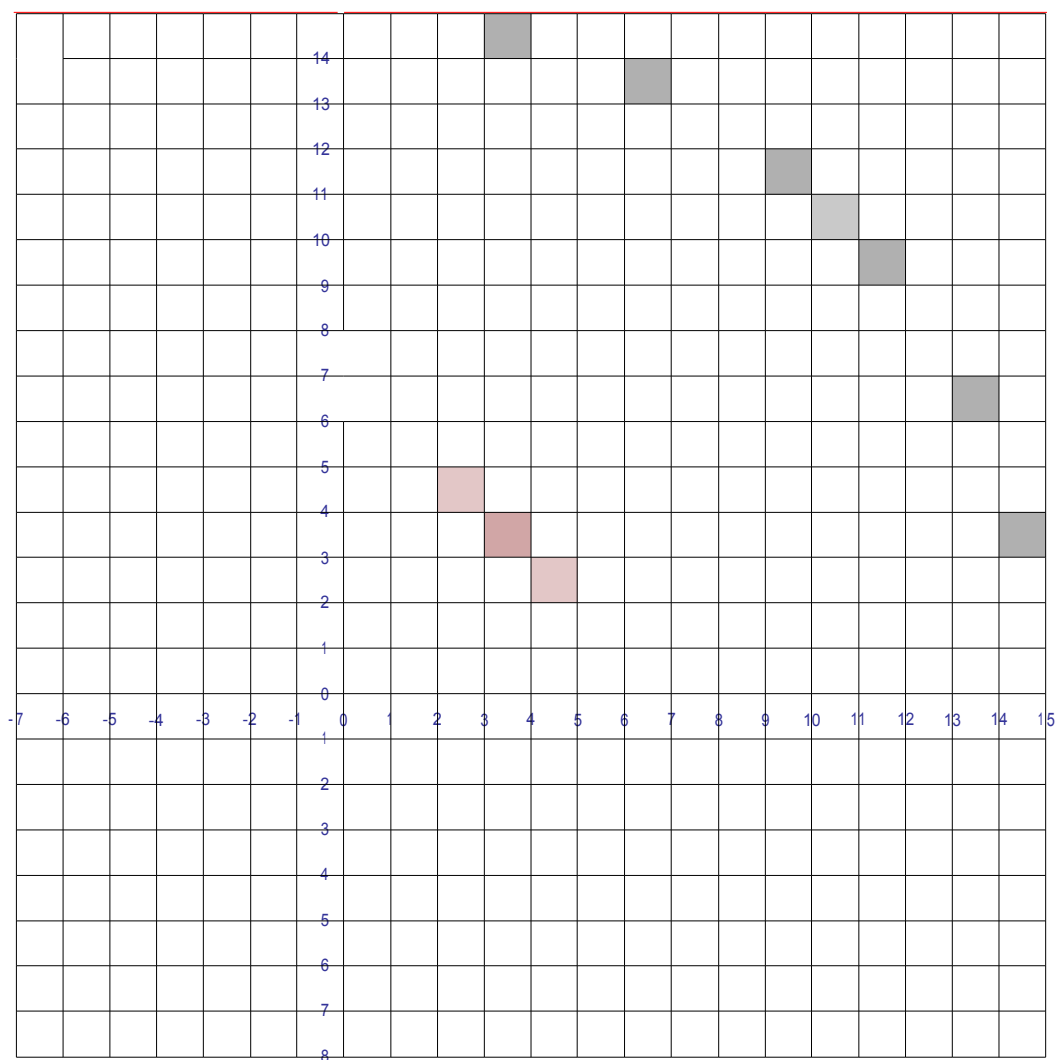


Tabla 3.8

<<<===== Programa BordeW1.bas =====>>>

Radio del borde : 10 % del espesor del aislamiento.

Espesor del aislamiento: 10 unidades.

Potencial aplicado : 10 unidades.

Numero de iteraciones : 100 (Iteraciones previas: 900)

1 .- Valores, calculados en primera aproximación, de los potenciales en los puntos W(i,j) de la malla de 201 filas X 46 columnas

Zona del borde de bobina (Sector Coaxial transformado al plano W)

col.: 0 20 40 60 80 100 120 140 160 180 200

ang(o) \====> Potencial en los puntos W(j,ang(k))

0	10.0	9.446	8.842	8.172	7.421	6.572	5.604	4.494	3.212	1.726	0.00
10	10.0	9.238	8.609	7.915	7.140	6.267	5.279	4.159	2.895	1.493	0.00
20	10.0	9.108	8.450	7.744	6.957	6.076	5.086	3.977	2.745	1.405	0.00
30	10.0	9.049	8.352	7.638	6.846	5.962	4.974	3.875	2.665	1.360	0.00
40	10.0	9.030	8.305	7.587	6.793	5.908	4.923	3.829	2.629	1.340	0.00
45	10.0	9.028	8.299	7.581	6.786	5.902	4.916	3.823	2.624	1.338	0.00

2 .- Relajación:/ Iteración No: 950

Zona del borde de bobina: Posición (j,k) desde el cobre

col.: 0 20 40 60 80 100 120 140 160 180 200

ang(o) \====> Potencial en los puntos W(j,ang(k))

0	10.0	9.446	8.842	8.172	7.421	6.572	5.604	4.494	3.212	1.726	0.00
10	10.0	9.379	8.722	8.008	7.219	6.336	5.342	4.220	2.955	1.539	0.00
20	10.0	9.333	8.636	7.889	7.070	6.164	5.155	4.031	2.787	1.431	0.00
30	10.0	9.303	8.581	7.811	6.973	6.052	5.034	3.912	2.686	1.370	0.00
40	10.0	9.289	8.554	7.772	6.925	5.997	4.976	3.855	2.638	1.342	0.00
45	10.0	9.287	8.550	7.767	6.919	5.990	4.968	3.848	2.632	1.339	0.00

3 .- Relajación:/ Iteración No: 1000

Zona del borde de bobina: Posición (j,k) desde el cobre

col.: 0 20 40 60 80 100 120 140 160 180 200

ang(o) \====> Potencial en los puntos W(j,ang(k))

0	10.0	9.446	8.842	8.172	7.421	6.572	5.604	4.494	3.212	1.726	0.00
10	10.0	9.379	8.722	8.008	7.219	6.336	5.342	4.221	2.955	1.539	0.00
20	10.0	9.333	8.637	7.889	7.071	6.164	5.155	4.031	2.787	1.431	0.00
30	10.0	9.303	8.581	7.811	6.974	6.053	5.035	3.912	2.686	1.370	0.00
40	10.0	9.289	8.554	7.773	6.926	5.998	4.976	3.855	2.638	1.342	0.00
45	10.0	9.287	8.551	7.768	6.920	5.991	4.969	3.848	2.632	1.339	0.00

4. - Resultado:

Posición x (desde el cobre), de las Equipotenciales vistas en % de la tensión aplicada

Espesor del aislamiento:10 unidades base

Radio del borde: 10 % del espesor del aislamiento

Pos\Eq.90% 80% 70% 60% 50% 40% 30% 20% 10% 0%

Zona del borde de bobina: posición radial x desde el borde del cobre

ang(o) \ posición x (Plano Z) ---> (r=ro+x)

0.0	0.520	1.174	1.949	2.836	3.822	4.900	6.062	7.301	8.615	10.0
5.0	0.487	1.110	1.854	2.711	3.673	4.735	5.894	7.149	8.510	10.0
10.0	0.462	1.058	1.776	2.608	3.549	4.597	5.754	7.025	8.427	10.0
15.0	0.443	1.016	1.712	2.523	3.446	4.483	5.639	6.924	8.361	10.0
20.0	0.427	0.983	1.661	2.454	3.363	4.391	5.545	6.842	8.310	10.0
25.0	0.416	0.958	1.620	2.400	3.297	4.318	5.471	6.777	8.269	10.0
30.0	0.407	0.939	1.590	2.359	3.248	4.262	5.414	6.728	8.238	10.0
35.0	0.402	0.926	1.569	2.331	3.213	4.223	5.375	6.694	8.217	10.0
40.0	0.398	0.918	1.557	2.314	3.192	4.200	5.352	6.674	8.203	10.0
45.0	0.397	0.915	1.553	2.308	3.186	4.192	5.344	6.667	8.199	10.0

**Fig. 3.14. -Equipotenciales en el borde de la sección del aislamiento de una bobina de AT, evaluadas por los programas Equipt y BordeW.**

**Radio del borde: 10% del espesor del aislamiento.  
Diferencia entre Equipotenciales: 10% de la tensión aplicada.**

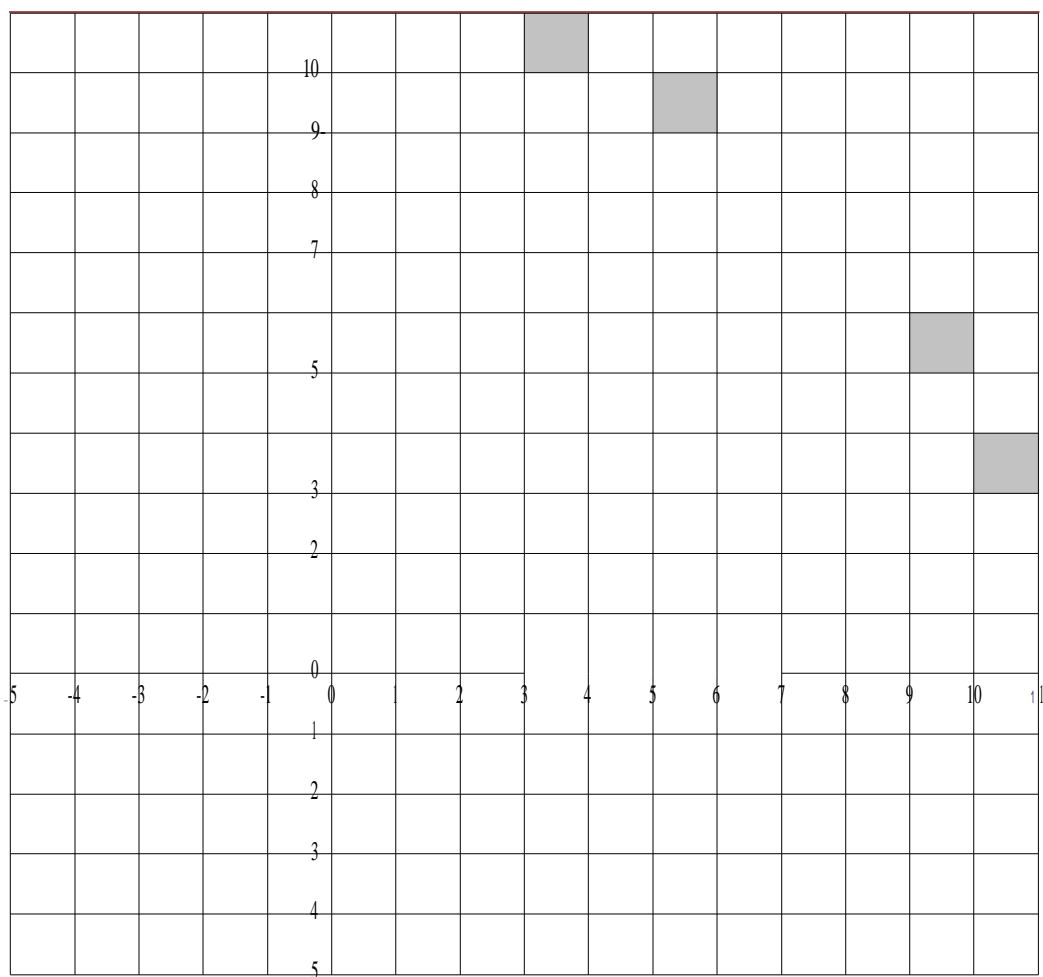


Tabla 3.9

<<<=====Programa BordeW1.bas=====>>>

Radio del borde : 20 % del espesor del aislamiento.

Espesor del aislamiento: 10 unidades.

Potencial aplicado : 10 unidades.

Número de iteraciones : 1500

1.- Valores, calculados en primera aproximación, de los potenciales en los puntos W(i,j) de la malla de 201 filas X 46 columnas

Zona del borde de bobina (Sector coaxial transformado al plano W)

col.: 0 20 40 60 80 100 120 140 160 180 200

ang(o) \====> Potencial en los puntos W(j,ang(k))

0	10.0	9.342	8.635	7.872	7.045	6.142	5.151	4.058	2.847	1.501	0.00
10	10.0	9.086	8.339	7.556	6.708	5.789	4.790	3.705	2.534	1.290	0.00
20	10.0	9.009	8.156	7.356	6.504	5.586	4.596	3.533	2.402	1.216	0.00
30	10.0	9.001	8.069	7.239	6.385	5.469	4.488	3.440	2.333	1.179	0.00
40	10.0	9.000	8.039	7.186	6.329	5.415	4.438	3.399	2.303	1.163	0.00
45	10.0	9.000	8.037	7.180	6.322	5.409	4.432	3.394	2.299	1.161	0.00

2.- Relajación:/ Iteración No: 1300

Zona del borde de bobina: Posición (j,k) desde el cobre

col.: 0 20 40 60 80 100 120 140 160 180 200

ang(o) \ potencial en los puntos W(j,ang(k))

0	10.0	9.342	8.635	7.872	7.045	6.142	5.151	4.058	2.847	1.501	0.00
10	10.0	9.264	8.500	7.692	6.828	5.897	4.890	3.798	2.615	1.341	0.00
20	10.0	9.214	8.408	7.566	6.675	5.726	4.711	3.626	2.471	1.254	0.00
30	10.0	9.183	8.350	7.486	6.578	5.618	4.600	3.522	2.387	1.207	0.00
40	10.0	9.169	8.322	7.447	6.531	5.566	4.547	3.473	2.349	1.185	0.00
45	10.0	9.167	8.319	7.442	6.525	5.560	4.541	3.467	2.344	1.183	0.00

3.- Relajación:/ Iteración No: 1500

Zona del borde de bobina: Posición (j,k) desde el cobre

col.: 0 20 40 60 80 100 120 140 160 180 200

ang(o) \ potencial en los puntos W(j,ang(k))

0	10.0	9.342	8.635	7.872	7.045	6.142	5.151	4.058	2.847	1.501	0.00
10	10.0	9.264	8.500	7.692	6.828	5.897	4.890	3.798	2.614	1.341	0.00
20	10.0	9.214	8.407	7.565	6.675	5.726	4.711	3.626	2.470	1.254	0.00
30	10.0	9.183	8.350	7.485	6.578	5.618	4.600	3.522	2.387	1.207	0.00
40	10.0	9.169	8.322	7.446	6.531	5.567	4.547	3.473	2.349	1.185	0.00
45	10.0	9.167	8.318	7.442	6.525	5.559	4.540	3.467	2.344	1.183	0.00

4.- Resultado:

Posición x (desde el cobre), de las Equipotenciales

vistas en % de la tensión aplicada

Espesor del aislamiento: 10 unidades.

Radio del borde: 20 % del espesor del aislamiento

Pos\Eq. 90% 80% 70% 60% 50% 40% 30% 20% 10% 0%

Zona del borde de bobina: posición radial x desde el borde del cobre

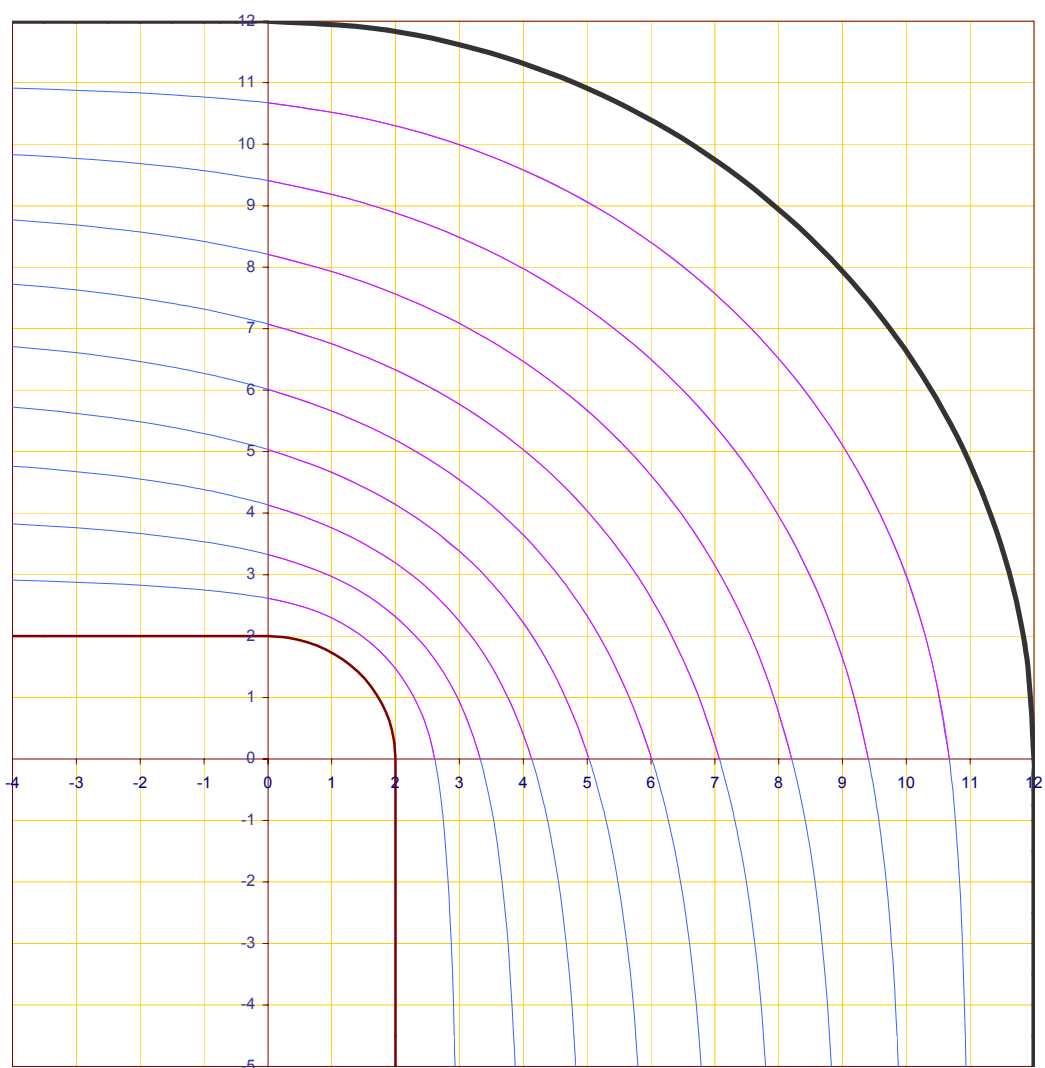
ang(o) \ posición x (Plano Z) --> (r=ro+x)

0.0	0.613	1.325	2.133	3.031	4.013	5.073	6.206	7.407	8.673	10.0
5.0	0.575	1.256	2.035	2.907	3.869	4.917	6.050	7.267	8.577	10.0
10.0	0.547	1.201	1.955	2.806	3.750	4.788	5.922	7.156	8.505	10.0
15.0	0.526	1.158	1.891	2.723	3.653	4.683	5.818	7.066	8.449	10.0
20.0	0.510	1.124	1.840	2.657	3.575	4.598	5.734	6.995	8.405	10.0
25.0	0.498	1.098	1.801	2.605	3.514	4.532	5.668	6.940	8.370	10.0
30.0	0.489	1.079	1.772	2.567	3.468	4.482	5.619	6.898	8.344	10.0
35.0	0.483	1.066	1.751	2.540	3.436	4.447	5.585	6.869	8.327	10.0
40.0	0.480	1.059	1.740	2.524	3.417	4.427	5.565	6.852	8.317	10.0
45.0	0.479	1.056	1.736	2.519	3.411	4.420	5.558	6.846	8.313	10.0



**Fig. 3.15. -Equipotenciales en el borde de la sección del aislamiento de una bobina de AT, evaluadas por los programas Equipot y BordeW.**

**Radio del borde: 20% del espesor del aislamiento.  
Diferencia entre Equipotenciales: 10% de la tensión aplicada.**



**Tabla 3.10**

<<<=====Programa BordeW1.bas=====>>>

Radio del borde : 30 % del espesor del aislamiento.  
 Espesor del aislamiento: 10 unidades.  
 Potencial aplicado : 10 unidades.  
 Numero de iteraciones : 1500

1.- Valores, calculados en primera aproximación, de los potenciales en los puntos W(i,j) de la malla de 201 filas X 46 columnas  
 Zona del borde de bobina (Sector coaxial transformado al plano W)  
 col.: 0 20 40 60 80 100 120 140 160 180 200  
 ang(o) \====> Potencial en los puntos W(j,ang(k))  
 0 10.0 9.281 8.515 7.701 6.832 5.901 4.899 3.819 2.650 1.382 0.00  
 10 10.0 9.025 8.179 7.345 6.463 5.524 4.526 3.467 2.351 1.189 0.00  
 20 10.0 9.001 8.033 7.141 6.252 5.320 4.339 3.308 2.233 1.126 0.00  
 30 10.0 9.000 8.005 7.053 6.138 5.208 4.237 3.224 2.173 1.094 0.00  
 40 10.0 9.000 8.001 7.027 6.092 5.158 4.191 3.186 2.146 1.080 0.00  
 45 10.0 9.000 8.001 7.024 6.087 5.152 4.186 3.182 2.143 1.078 0.00

2.- Relajación:/ Iteración No: 1300

Zona del borde de bobina: Posición (j,k) desde el cobre  
 col.: 0 20 40 60 80 100 120 140 160 180 200  
 ang(o) \ potencial en los puntos W(j,ang(k))  
 0 10.0 9.281 8.515 7.701 6.832 5.901 4.899 3.819 2.650 1.382 0.00  
 10 10.0 9.195 8.369 7.508 6.604 5.649 4.638 3.566 2.431 1.236 0.00  
 20 10.0 9.144 8.274 7.379 6.450 5.480 4.467 3.407 2.303 1.162 0.00  
 30 10.0 9.114 8.217 7.300 6.356 5.378 4.364 3.314 2.231 1.123 0.00  
 40 10.0 9.100 8.190 7.263 6.311 5.330 4.317 3.272 2.199 1.105 0.00  
 45 10.0 9.098 8.187 7.258 6.306 5.324 4.311 3.267 2.195 1.103 0.00

3.- Relajación:/ Iteración No: 1500

Zona del borde de bobina: Posición (j,k) desde el cobre  
 col.: 0 20 40 60 80 100 120 140 160 180 200  
 ang(o) \ potencial en los puntos W(j,ang(k))  
 0 10.0 9.281 8.515 7.701 6.832 5.901 4.899 3.819 2.650 1.382 0.00  
 10 10.0 9.195 8.369 7.508 6.604 5.649 4.638 3.566 2.431 1.237 0.00  
 20 10.0 9.144 8.274 7.379 6.450 5.481 4.467 3.407 2.303 1.162 0.00  
 30 10.0 9.114 8.217 7.300 6.356 5.378 4.365 3.315 2.232 1.123 0.00  
 40 10.0 9.100 8.191 7.263 6.312 5.330 4.317 3.272 2.199 1.105 0.00  
 45 10.0 9.098 8.187 7.259 6.306 5.324 4.311 3.267 2.196 1.103 0.00

**4.- Resultado:**

Posición x (desde el cobre), de las Equipotenciales vistas en % de la tensión aplicada  
 Espesor del aislamiento: 10 unidades.

Radio del borde: 30 % del espesor del aislamiento

Pos\Eq.	90%	80%	70%	60%	50%	40%	30%	20%	10%	0%
Zona del borde de bobina: posición radial x desde el borde del cobre										
ang(o) \	posición x (Plano Z) --> (r=ro+x)									
0.0	0.669	1.418	2.246	3.150	4.128	5.176	6.290	7.467	8.705	10.0
5.0	0.627	1.344	2.143	3.024	3.984	5.022	6.138	7.334	8.614	10.0
10.0	0.597	1.286	2.062	2.922	3.867	4.898	6.017	7.229	8.548	10.0
15.0	0.576	1.242	1.998	2.841	3.773	4.798	5.920	7.148	8.498	10.0
20.0	0.559	1.209	1.948	2.777	3.699	4.719	5.843	7.084	8.460	10.0
25.0	0.548	1.184	1.910	2.728	3.642	4.658	5.784	7.035	8.430	10.0
30.0	0.539	1.166	1.882	2.692	3.600	4.613	5.741	6.999	8.409	10.0
35.0	0.533	1.153	1.863	2.667	3.570	4.581	5.710	6.974	8.394	10.0
40.0	0.530	1.146	1.852	2.652	3.553	4.563	5.693	6.959	8.384	10.0
45.0	0.529	1.144	1.848	2.648	3.548	4.557	5.687	6.954	8.382	10.0

**Fig. 3.16. -Equipotenciales en el borde de la sección del aislamiento de una bobina de AT, evaluadas por los programas Equipt y BordeW.**

**Radio del borde: 30% del espesor del aislamiento.  
Diferencia entre Equipotenciales: 10% de la tensión aplicada.**

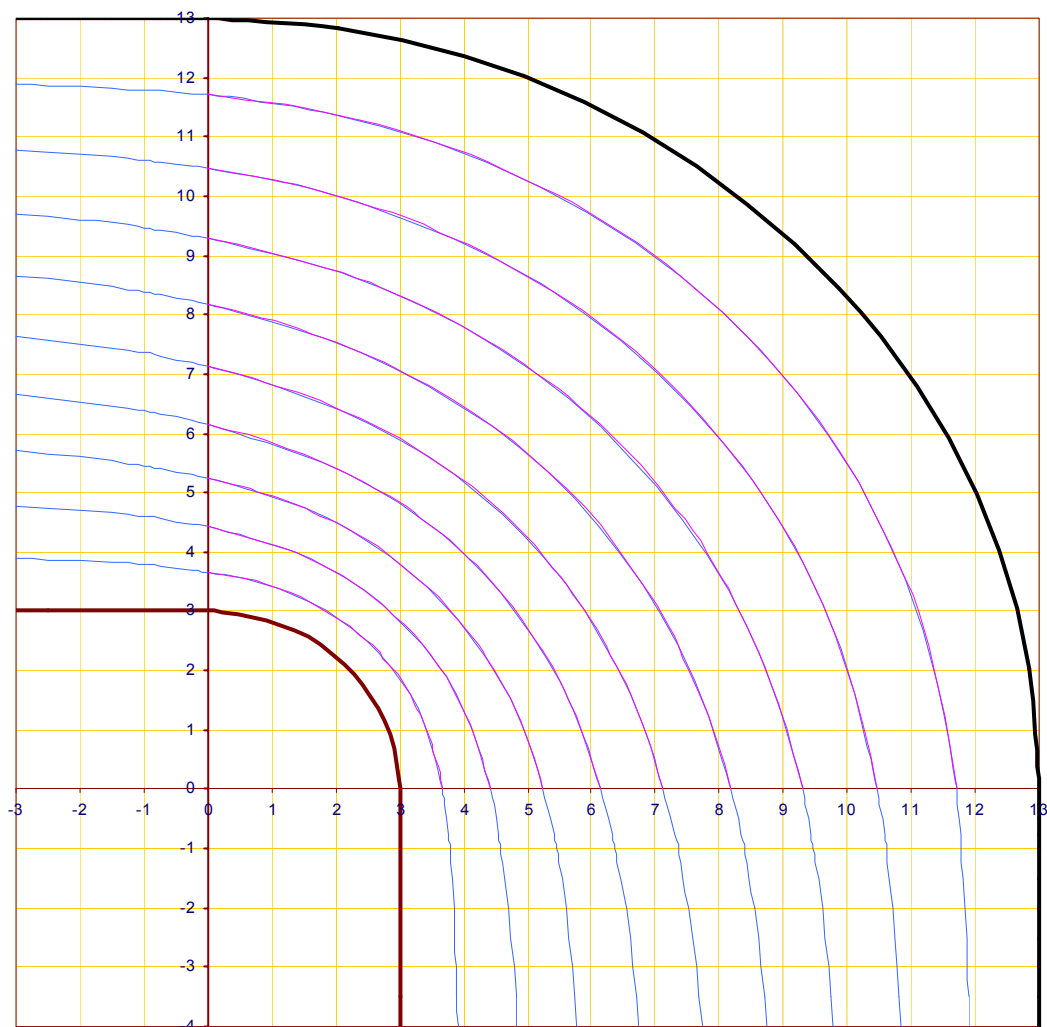


Tabla 3.11

<<<===== Programa BordeW1.bas =====>>>

Radio del borde : 40 % del espesor del aislamiento.

Espesor del aislamiento: 10 unidades.

Potencial aplicado : 10 unidades.

Numero de iteraciones : 100 (Iteraciones previas 1000)

1.- Valores, calculados en primera aproximación, de los potenciales en los puntos W(i,j) de la malla de 201 filas X 46 columnas

Zona del borde de bobina (Sector Coaxial transformado al plano W)

col.: 0 20 40 60 80 100 120 140 160 180 200

ang(o) \====> Potencial en los puntos W(j,ang(k))

0	10.0	9.244	8.445	7.602	6.710	5.765	4.760	3.689	2.545	1.319	0.00
10	10.0	9.007	8.085	7.208	6.307	5.361	4.368	3.329	2.247	1.133	0.00
20	10.0	9.000	8.005	7.039	6.103	5.158	4.184	3.175	2.136	1.074	0.00
30	10.0	9.000	8.000	7.006	6.029	5.065	4.092	3.100	2.081	1.045	0.00
40	10.0	9.000	8.000	7.002	6.012	5.035	4.057	3.066	2.057	1.033	0.00
45	10.0	9.000	8.000	7.001	6.011	5.032	4.054	3.063	2.055	1.032	0.00

2.- Relajación:/ Iteración No: 1050

Zona del borde de bobina: Posición (j,k) desde el cobre

col.: 0 20 40 60 80 100 120 140 160 180 200

ang(o) \====> Potencial en los puntos W(j,ang(k))

0	10.0	9.244	8.445	7.602	6.710	5.765	4.760	3.689	2.545	1.319	0.00
10	10.0	9.157	8.295	7.406	6.481	5.515	4.503	3.444	2.336	1.183	0.00
20	10.0	9.107	8.204	7.281	6.333	5.354	4.343	3.297	2.220	1.117	0.00
30	10.0	9.079	8.151	7.208	6.246	5.261	4.250	3.215	2.158	1.084	0.00
40	10.0	9.066	8.126	7.175	6.206	5.218	4.208	3.178	2.130	1.069	0.00
45	10.0	9.065	8.124	7.170	6.201	5.213	4.203	3.174	2.127	1.067	0.00

3.- Relajación:/ Iteración No: 1100

Zona del borde de bobina: Posición (j,k) desde el cobre

col.: 0 20 40 60 80 100 120 140 160 180 200

ang(o) \====> Potencial en los puntos W(j,ang(k))

0	10.0	9.244	8.445	7.602	6.710	5.765	4.760	3.689	2.545	1.319	0.00
10	10.0	9.157	8.295	7.406	6.481	5.515	4.503	3.444	2.336	1.183	0.00
20	10.0	9.107	8.204	7.281	6.333	5.354	4.343	3.297	2.220	1.117	0.00
30	10.0	9.079	8.151	7.208	6.246	5.261	4.250	3.215	2.158	1.084	0.00
40	10.0	9.066	8.126	7.175	6.206	5.218	4.208	3.178	2.130	1.069	0.00
45	10.0	9.065	8.124	7.170	6.201	5.213	4.203	3.174	2.127	1.067	0.00

4.- Resultado:

Posición x (desde el cobre), de las Equipotenciales vistas en % de la tensión aplicada

Espesor del aislamiento: 10 unidades

Radio del borde: 40 % del espesor del aislamiento

Pos\Eq.90% 80% 70% 60% 50% 40% 30% 20% 10% 0%

Zona del borde de bobina: posición radial x desde el borde del cobre

ang(o) \ posición x (Plano Z) ----> (r=ro+x)

0.0	0.713	1.494	2.343	3.258	4.237	5.278	6.377	7.533	8.742	10.0
5.0	0.669	1.417	2.239	3.131	4.095	5.127	6.230	7.404	8.655	10.0
10.0	0.639	1.359	2.157	3.031	3.981	5.008	6.115	7.307	8.594	10.0
15.0	0.617	1.316	2.094	2.953	3.891	4.914	6.025	7.232	8.549	10.0
20.0	0.602	1.284	2.047	2.892	3.822	4.841	5.955	7.174	8.515	10.0
25.0	0.590	1.260	2.011	2.846	3.769	4.785	5.902	7.131	8.489	10.0
30.0	0.582	1.243	1.986	2.813	3.731	4.745	5.864	7.100	8.470	10.0
35.0	0.577	1.232	1.968	2.790	3.705	4.717	5.837	7.078	8.458	10.0
40.0	0.574	1.225	1.958	2.778	3.689	4.700	5.822	7.066	8.450	10.0

45.0 0.573 1.223 1.955 2.773 3.684 4.696 5.817 7.062 8.448 10.0

**Fig. 3.17. -Equipotenciales en el borde de la sección del aislamiento de una bobina de AT, evaluados por los programas Equipt y borde W.**

**Radio del borde: 40% del espesor del aislamiento.  
Diferencia entre Equipotenciales: 10% de la tensión aplicada.**

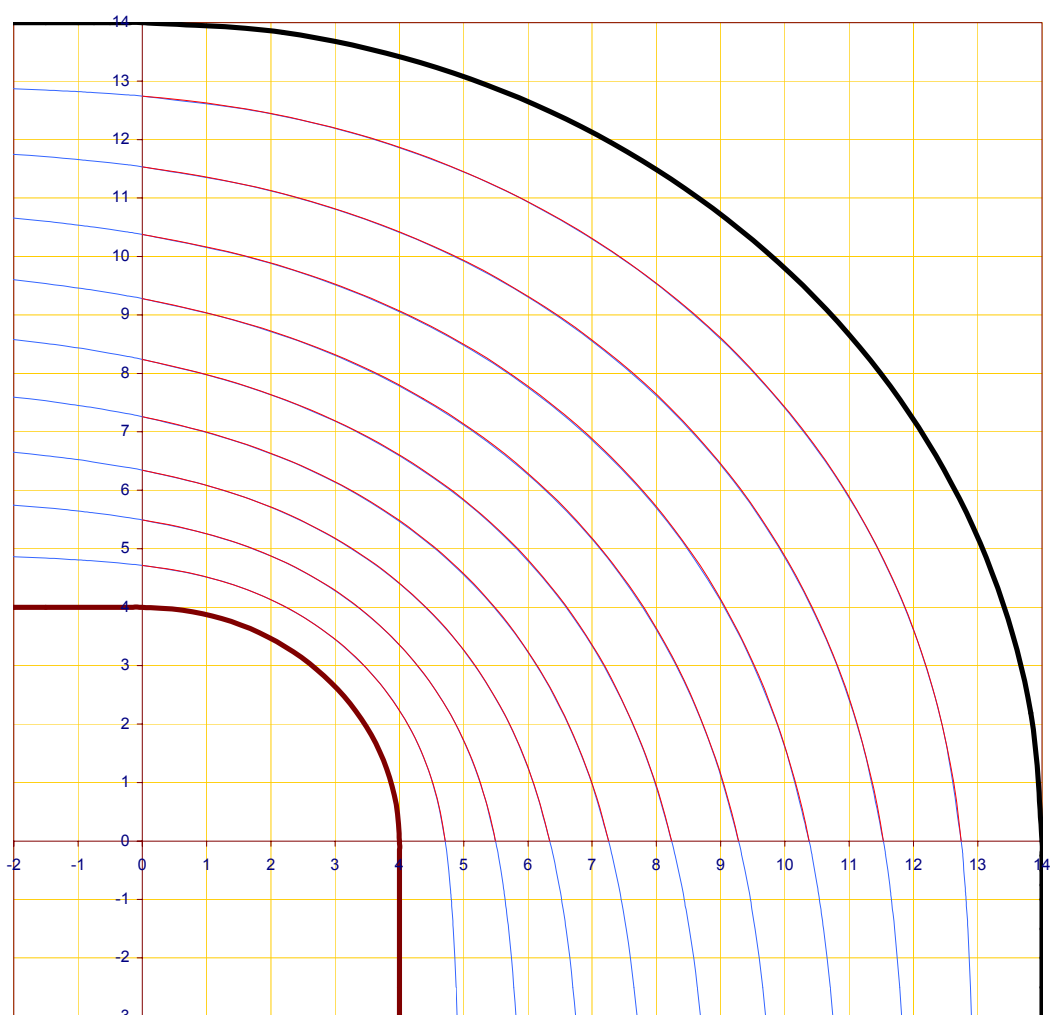


Tabla 3.12

<<<===== Programa BordeW1.bas =====>>>  
 Radio del borde : 50 % del espesor del aislamiento.  
 Espesor del aislamiento: 10 unidades.  
 Potencial aplicado : 10 unidades.  
 Numero de iteraciones : 200 (Iteraciones previas: 1000)

1.- Valores, calculados en primera aproximación, de los potenciales en los puntos W(i,j) de la malla de 201 filas X 46 columnas  
 Zona del borde de bobina (Sector Coaxial transformado al plano W)  
 col.: 0 20 40 60 80 100 120 140 160 180 200  
 ang(o) \====> Potencial en los puntos W(j,ang(k))  
 0 10.0 9.217 8.392 7.528 6.620 5.665 4.658 3.594 2.468 1.273 0.00  
 10 10.0 9.002 8.036 7.115 6.193 5.242 4.254 3.230 2.174 1.094 0.00  
 20 10.0 9.000 8.001 7.008 6.031 5.061 4.083 3.087 2.071 1.040 0.00  
 30 10.0 9.000 8.000 7.000 6.003 5.012 4.023 3.029 2.027 1.016 0.00  
 40 10.0 9.000 8.000 7.000 6.001 5.004 4.009 3.013 2.014 1.009 0.00  
 45 10.0 9.000 8.000 7.000 6.001 5.003 4.008 3.012 2.012 1.008 0.00

2.- Relajación: / Iteración No: 1100

Zona del borde de bobina: Posición (j,k) desde el cobre  
 col.: 0 20 40 60 80 100 120 140 160 180 200  
 ang(o) \====> Potencial en los puntos W(j,ang(k))  
 0 10.0 9.217 8.392 7.528 6.620 5.665 4.658 3.594 2.468 1.273 0.00  
 10 10.0 9.129 8.242 7.332 6.393 5.419 4.408 3.358 2.269 1.146 0.00  
 20 10.0 9.082 8.155 7.214 6.253 5.268 4.258 3.223 2.165 1.088 0.00  
 30 10.0 9.056 8.107 7.148 6.174 5.184 4.176 3.151 2.111 1.058 0.00  
 40 10.0 9.045 8.085 7.118 6.139 5.146 4.140 3.119 2.087 1.046 0.00  
 45 10.0 9.044 8.083 7.114 6.135 5.142 4.136 3.116 2.084 1.044 0.00

3.- Relajación:/ Iteración No: 1200

Zona del borde de bobina: Posición (j,k) desde el cobre  
 col.: 0 20 40 60 80 100 120 140 160 180 200  
 ang(o) \====> Potencial en los puntos W(j,ang(k))  
 0 10.0 9.217 8.392 7.528 6.620 5.665 4.658 3.594 2.468 1.273 0.00  
 10 10.0 9.129 8.242 7.332 6.393 5.419 4.408 3.358 2.269 1.146 0.00  
 20 10.0 9.082 8.155 7.214 6.253 5.268 4.259 3.224 2.165 1.088 0.00  
 30 10.0 9.056 8.107 7.148 6.174 5.184 4.176 3.151 2.111 1.058 0.00  
 40 10.0 9.045 8.086 7.118 6.139 5.147 4.140 3.120 2.087 1.046 0.00  
 45 10.0 9.044 8.083 7.114 6.135 5.142 4.136 3.116 2.084 1.044 0.00

#### 4. - Resultado:

Posición x (desde el cobre), de las Equipotenciales vistas en % de la tensión aplicada

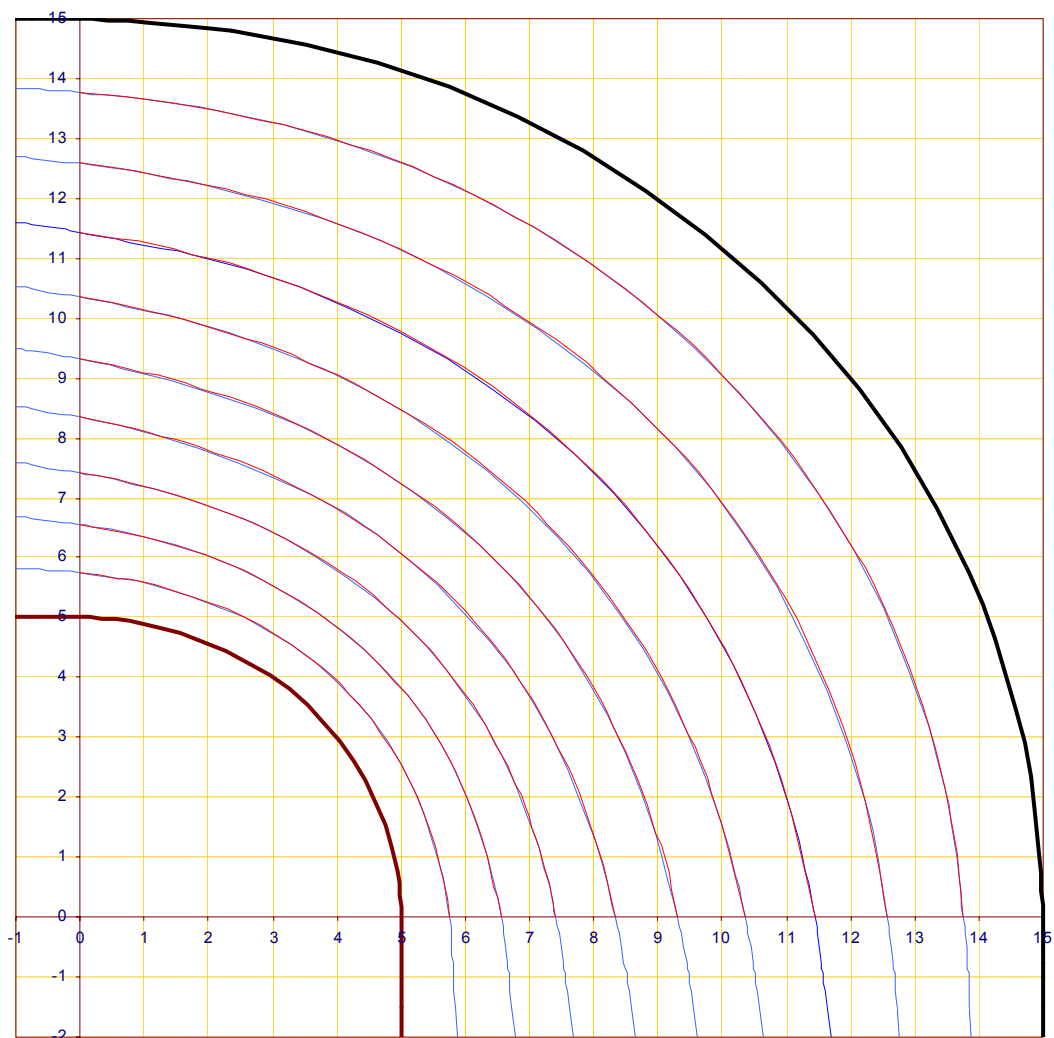
Espesor del aislamiento:10 unidades.

Radio del borde: 50 % del espesor del aislamiento

Pos\Eq.	90%	80%	70%	60%	50%	40%	30%	20%	10%	0%
Zona del borde de bobina: posición radial x desde el borde del cobre										
ang(o) \	posición x (Plano Z) ----> (r=ro+x)									
0.0	0.746	1.551	2.415	3.338	4.317	5.352	6.441	7.580	8.768	10.0
5.0	0.701	1.472	2.310	3.211	4.177	5.205	6.298	7.456	8.685	10.0
10.0	0.671	1.415	2.230	3.114	4.067	5.092	6.189	7.365	8.629	10.0
15.0	0.650	1.373	2.170	3.039	3.983	5.003	6.106	7.297	8.589	10.0
20.0	0.635	1.343	2.125	2.983	3.919	4.937	6.043	7.246	8.558	10.0
25.0	0.624	1.321	2.092	2.941	3.871	4.887	5.996	7.208	8.536	10.0
30.0	0.617	1.305	2.069	2.911	3.836	4.851	5.962	7.181	8.520	10.0
35.0	0.612	1.295	2.053	2.891	3.814	4.826	5.939	7.162	8.510	10.0
40.0	0.609	1.289	2.044	2.879	3.800	4.813	5.926	7.151	8.504	10.0
45.0	0.608	1.287	2.041	2.876	3.796	4.808	5.922	7.148	8.502	10.0

**Fig. 3.18. -Equipotenciales en el borde de la sección del aislamiento de una bobina de AT, evaluados por los programas Equipt y bordeW.**

**Radio del borde: 50% del espesor del aislamiento.  
Diferencia entre Equipotenciales: 10% de la tensión aplicada.**



Posición Desde el cobre	Grad R10%	Grad R20%	Grad R30%	Grad R40%	Grad R50%
<b>0,05</b>	<b>2,8438</b>	<b>2,2909</b>	<b>2,0312</b>	<b>1,8579</b>	<b>1,7389</b>
0,1	2,7153	2,2365	1,9984	1,8352	1,7218
0,15	2,6016	2,1853	1,967	1,8132	1,7052
0,2	2,5003	2,1371	1,9368	1,7918	1,6888
0,25	2,4095	2,0916	1,9077	1,7711	1,6729
0,3	2,3276	2,0487	1,8797	1,7509	1,6574
0,35	2,2535	2,0081	1,8528	1,7313	1,6421
0,4	2,186	1,9696	1,8268	1,7122	1,6272
0,45	2,1243	1,9331	1,8018	1,6937	1,6126
0,5	2,0676	1,8984	1,7776	1,6756	1,5984
0,55	2,0154	1,8654	1,7543	1,6581	1,5844
0,6	1,9671	1,834	1,7318	1,6409	1,5707
0,65	1,9223	1,804	1,71	1,6242	1,5574
0,7	1,8805	1,7754	1,6889	1,6079	1,5442
0,75	1,8414	1,748	1,6685	1,5921	1,5314
0,8	1,8049	1,7219	1,6487	1,5766	1,5188
0,85	1,7705	1,6968	1,6296	1,5615	1,5064
0,9	1,7382	1,6727	1,611	1,5467	1,4943
0,95	1,7076	1,6496	1,593	1,5323	1,4824
<b>1 (10%)</b>	<b>1,6787</b>	<b>1,6273</b>	<b>1,5755</b>	<b>1,5183</b>	<b>1,4708</b>
1,05	1,6514	1,606	1,5585	1,5045	1,4593
1,1	1,6254	1,5854	1,542	1,4911	1,4481
1,15	1,6006	1,5655	1,5259	1,4779	1,4371
1,2	1,577	1,5464	1,5103	1,4651	1,4263
1,25	1,5545	1,5279	1,4951	1,4525	1,4156
1,3	1,5329	1,51	1,4803	1,4402	1,4052
1,35	1,5123	1,4927	1,4658	1,4281	1,3949
1,4	1,4925	1,476	1,4518	1,4163	1,3848
1,45	1,4735	1,4598	1,4381	1,4048	1,3749
1,5	1,4552	1,4441	1,4247	1,3934	1,3652
1,55	1,4376	1,4289	1,4116	1,3823	1,3556
1,6	1,4207	1,4141	1,3989	1,3714	1,3462
1,65	1,4043	1,3997	1,3865	1,3608	1,3369
1,7	1,3885	1,3857	1,3743	1,3503	1,3278
1,75	1,3732	1,3722	1,3624	1,34	1,3189
1,8	1,3584	1,3589	1,3508	1,3299	1,31
1,9	1,3301	1,3336	1,3283	1,3103	1,2928
1,95	1,3167	1,3213	1,3174	1,3008	1,2843
<b>2 (20%)</b>	<b>1,3036</b>	<b>1,3094</b>	<b>1,3067</b>	<b>1,2914</b>	<b>1,2761</b>
2,05	1,2908	1,2978	1,2962	.....	etc.

**Tabla 3.13. -Relación Gradiente/Gradiente uniforme Vs posición desde el cobre, en la fila Kn del esquema de la Fig. 3.4, evaluados con diferencias finitas**



Nodos	Radio 10%		Radio 20%		Radio 30%		Radio 40%		Radio 50%	
	Posic. media	Er/Eunif medio	Posic. media	Er/Eunif medio	Posic. media	Er/Eunif medio	Posic. media	Er/Eunif medio	Posic. media	Er/Eunif medio
274-275	0,07	<b>2,71</b>	0,10	<b>2,20</b>	0,12	<b>1,95</b>	0,13	<b>1,80</b>	0,15	<b>1,69</b>
275-276	0,20	<b>2,43</b>	0,29	<b>2,02</b>	0,36	<b>1,82</b>	0,40	<b>1,69</b>	0,44	<b>1,60</b>
276-277	0,36	<b>2,19</b>	0,51	<b>1,87</b>	0,61	<b>1,70</b>	0,69	<b>1,59</b>	0,74	<b>1,52</b>
277-278	0,53	<b>2,00</b>	0,74	<b>1,73</b>	0,89	<b>1,59</b>	0,99	<b>1,50</b>	1,07	<b>1,44</b>
278-279	0,72	<b>1,83</b>	1,00	<b>1,61</b>	1,18	<b>1,50</b>	1,31	<b>1,42</b>	1,41	<b>1,37</b>
279-280	0,94	<b>1,69</b>	1,28	<b>1,50</b>	1,50	<b>1,41</b>	1,65	<b>1,35</b>	1,77	<b>1,30</b>
280-281	1,19	<b>1,57</b>	1,59	<b>1,41</b>	1,84	<b>1,33</b>	2,02	<b>1,28</b>	2,15	<b>1,24</b>
281-282	1,47	<b>1,45</b>	1,93	<b>1,32</b>	2,21	<b>1,25</b>	2,41	<b>1,21</b>	2,56	<b>1,18</b>
282-283	1,79	<b>1,35</b>	2,30	<b>1,24</b>	2,61	<b>1,18</b>	2,82	<b>1,15</b>	2,98	<b>1,13</b>
283-284	2,14	<b>1,26</b>	2,70	<b>1,16</b>	3,03	<b>1,12</b>	3,26	<b>1,09</b>	3,43	<b>1,07</b>
284-285	2,54	<b>1,18</b>	3,14	<b>1,09</b>	3,49	<b>1,06</b>	3,73	<b>1,04</b>	3,91	<b>1,02</b>
285-286	2,99	<b>1,10</b>	3,62	<b>1,03</b>	3,98	<b>1,00</b>	4,23	<b>0,98</b>	4,41	<b>0,98</b>
286-287	3,50	<b>1,02</b>	4,15	<b>0,96</b>	4,52	<b>0,94</b>	4,77	<b>0,93</b>	4,95	<b>0,93</b>
287-288	4,07	<b>0,95</b>	4,72	<b>0,90</b>	5,09	<b>0,89</b>	5,33	<b>0,89</b>	5,51	<b>0,89</b>
288-289	4,72	<b>0,88</b>	5,35	<b>0,85</b>	5,70	<b>0,84</b>	5,93	<b>0,84</b>	6,10	<b>0,85</b>
289-290	5,45	<b>0,81</b>	6,04	<b>0,79</b>	6,37	<b>0,79</b>	6,58	<b>0,80</b>	6,73	<b>0,80</b>
290-291	6,27	<b>0,74</b>	6,80	<b>0,73</b>	7,08	<b>0,74</b>	7,26	<b>0,75</b>	7,39	<b>0,76</b>
291-292	7,19	<b>0,68</b>	7,62	<b>0,68</b>	7,84	<b>0,69</b>	7,99	<b>0,71</b>	8,09	<b>0,73</b>
292-293	8,24	<b>0,61</b>	8,52	<b>0,63</b>	8,67	<b>0,65</b>	8,76	<b>0,67</b>	8,83	<b>0,69</b>
293-294	9,41	<b>0,55</b>	9,51	<b>0,58</b>	9,56	<b>0,60</b>	9,59	<b>0,63</b>	9,61	<b>0,65</b>

**Tabla 3.14. -Relación Gradiente / Gradiente uniforme ( Er/Eunif), entre los nodos de la línea AA de la Fig.3.8 vistos desde el cobre, para los radios del borde indicados, obtenida mediante elementos finitos**

**Fig. 3.19. - Relación Gradiente  $\nabla$  Gradiente uniforme ( $E_r/E_{unif}$ ) Vs. posición desde el borde del Cobre.  
Radio del borde: 10 % del espesor del aislamiento  
Curva 1 : Grafica de la Ec 1.16  
Curvas 2 y 3 : Resultado evaluado (Tablas 3.13 y 3.14)**

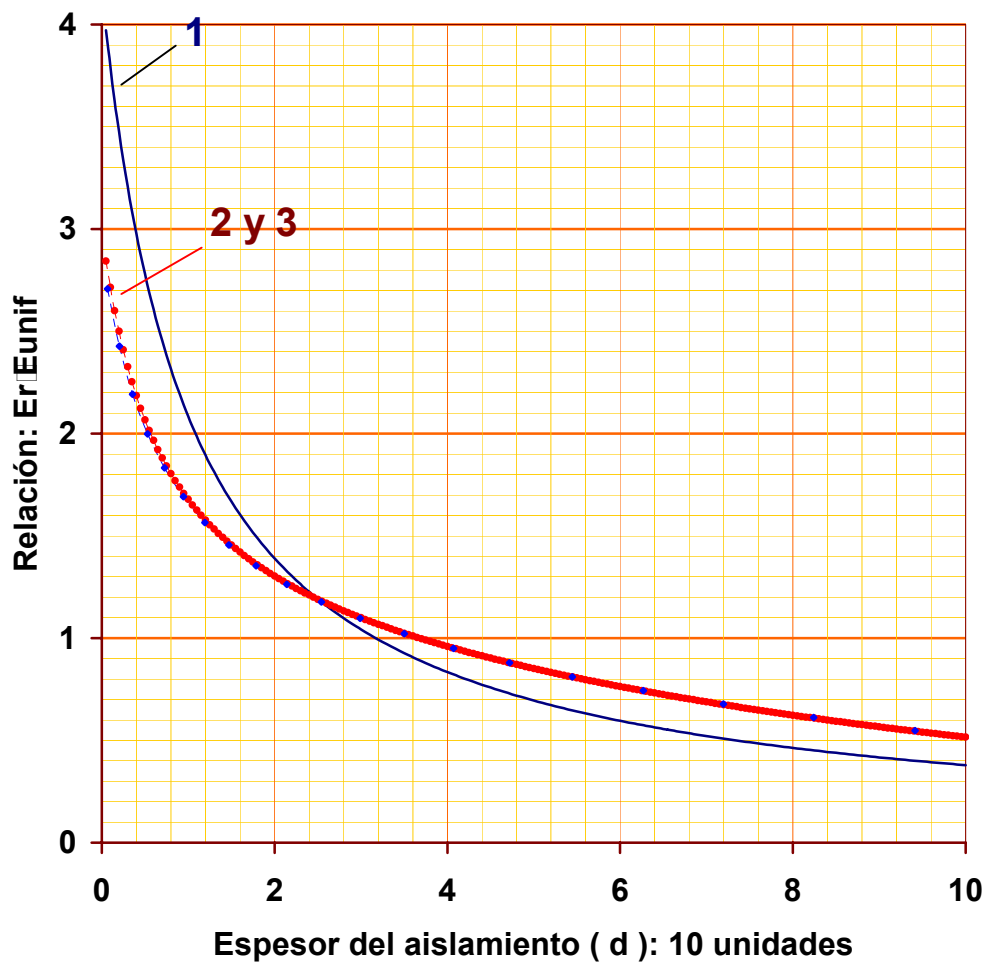
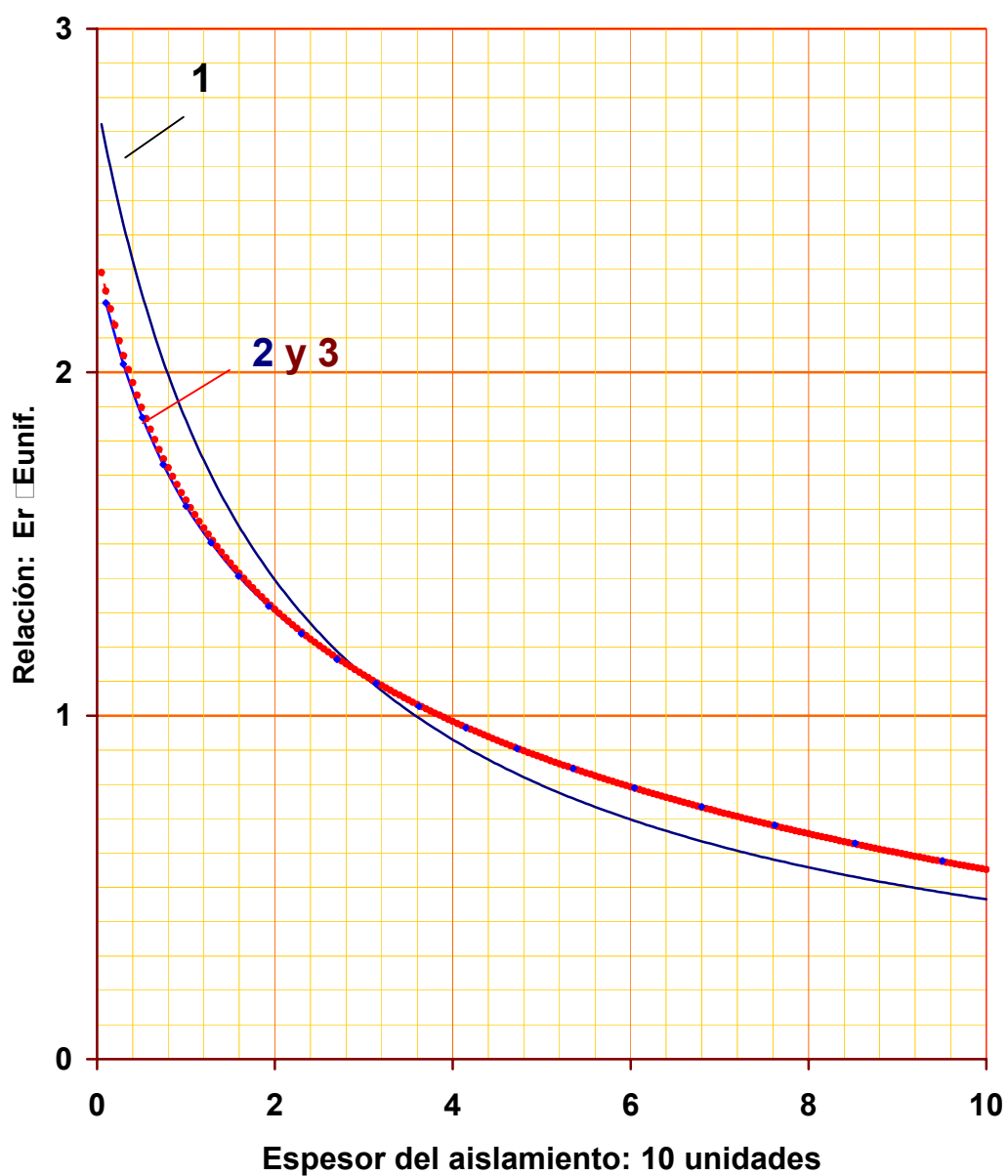


Fig. 3.20. -Relación  $E_r \square E_{unif.}$  (Gradiente Gradiente uniforme)  
vs. posición desde el borde del cobre.

Radio del borde : 20 % del espesor del aislamiento.

Curva 1: Gráfico de la Ec. 1.16

Curvas 2 y 3 : Resultado evaluado (Tablas 3.13 y 3.14).

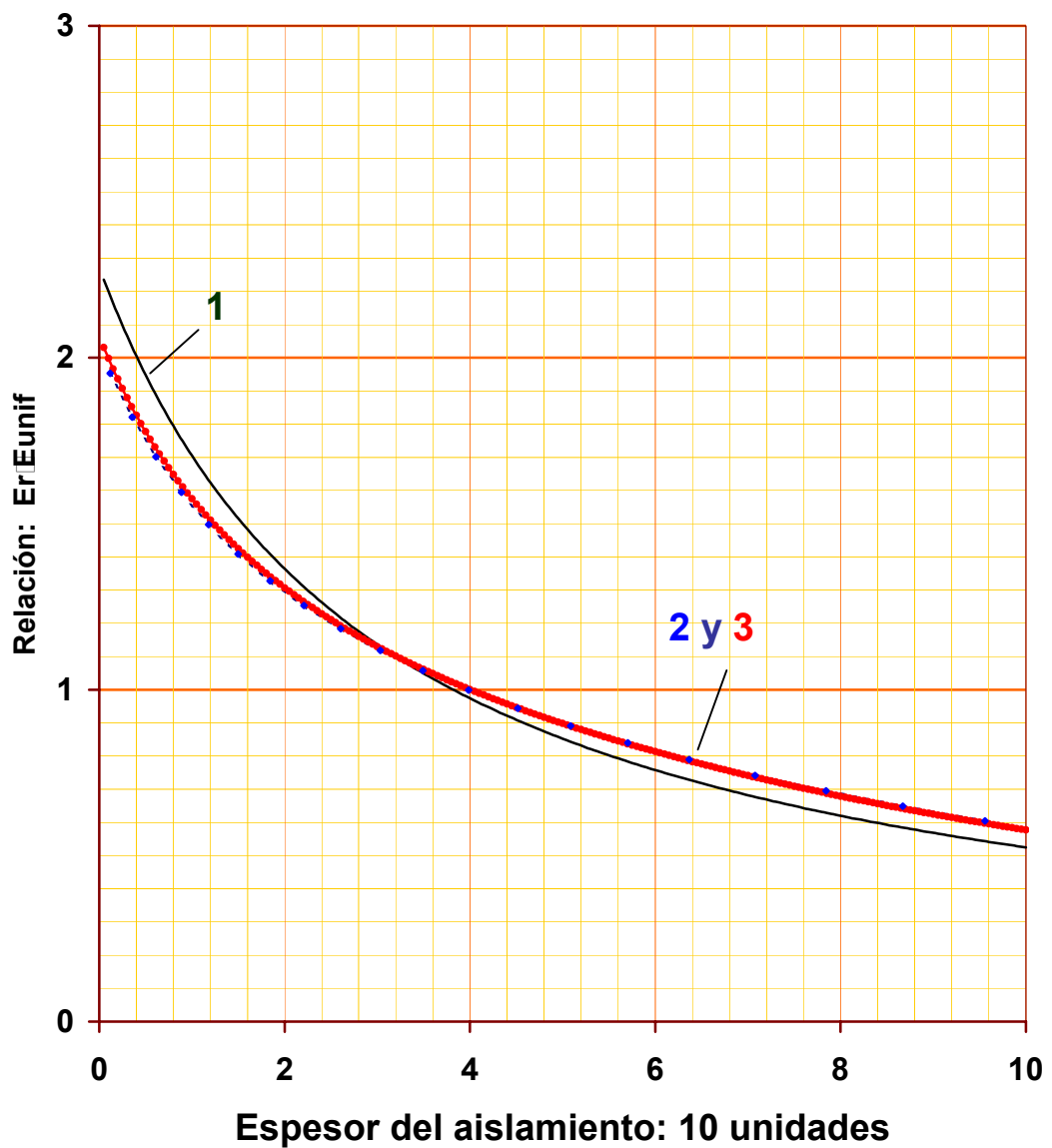


**Fig. 3.21. -Relación  $E_r/E_{unif}$  (Gradiente Gradiente uniforme)  
vs. posición desde el borde del cobre.**

**Radio del borde: 30 % del espesor del aislamiento.**

**Curva 1 : Grafica de la Ec 1.16**

**Curvas 2 y 3 : Resultado evaluado (Tablas 3.13 y 3.14)**

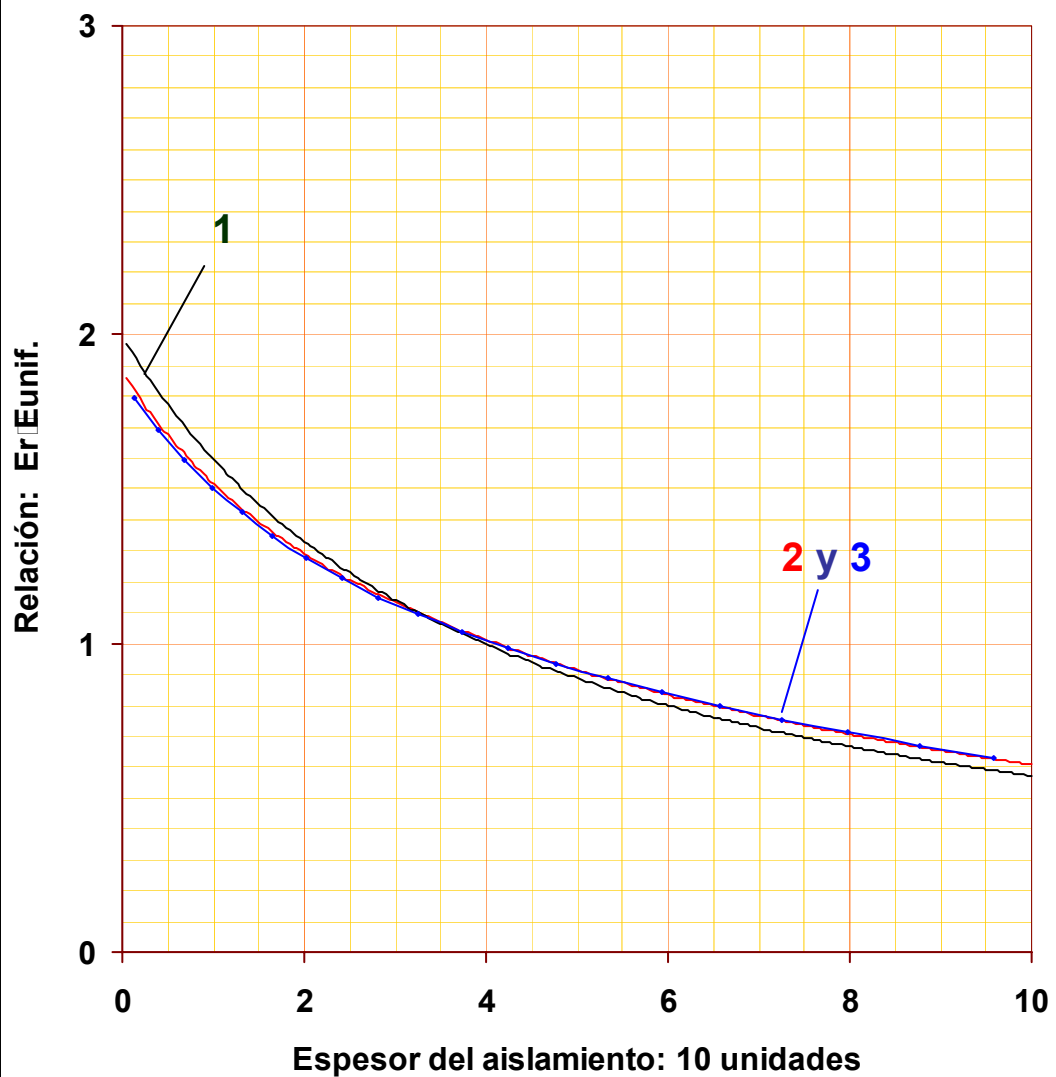


**Fig. 3.22. -Relación  $E_r/E_{unif}$  (Gradiente  $\nabla$  Gradiente uniforme)  
Vs. posición desde el borde del cobre.**

**Radio del borde: 40 % del espesor del aislamiento.**

**Curva 1 : Gráfica de la Ec 1.16**

**Curvas 2 y 3 : Resultado evaluado (Tablas 3.13 y 3.14).**



**Fig. 3.23. -Relación  $E_r/E_{med}$  (Gradiente/Gradiente promedio) vs. posición desde el borde del cobre.**

**Radio del cobre: 50 % del espesor del aislamiento.**

**Curva 1 : Gráfica de la Ec 1.16.**

**Curvas 2 y 3: Resultado evaluado (Tablas 3.13 y 3.14)**

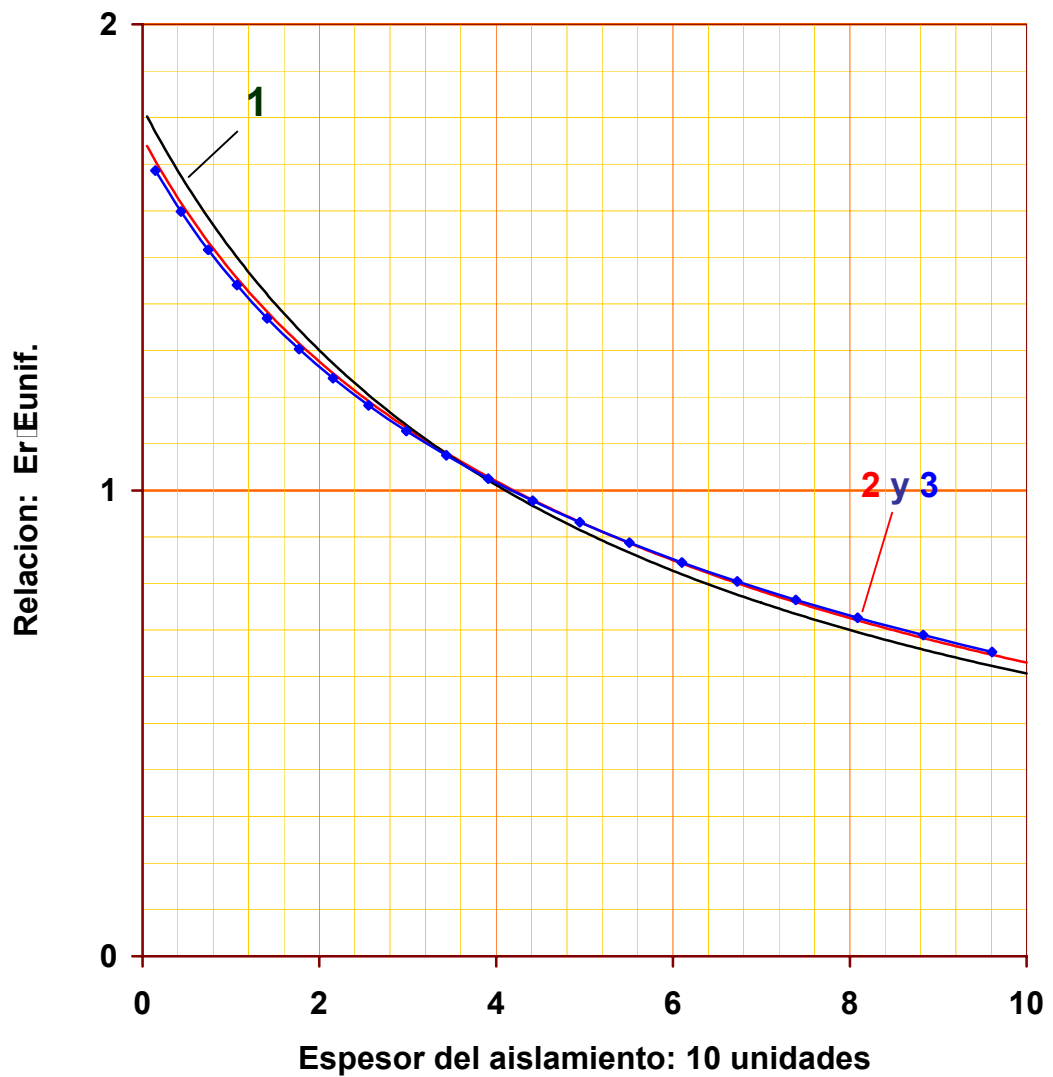
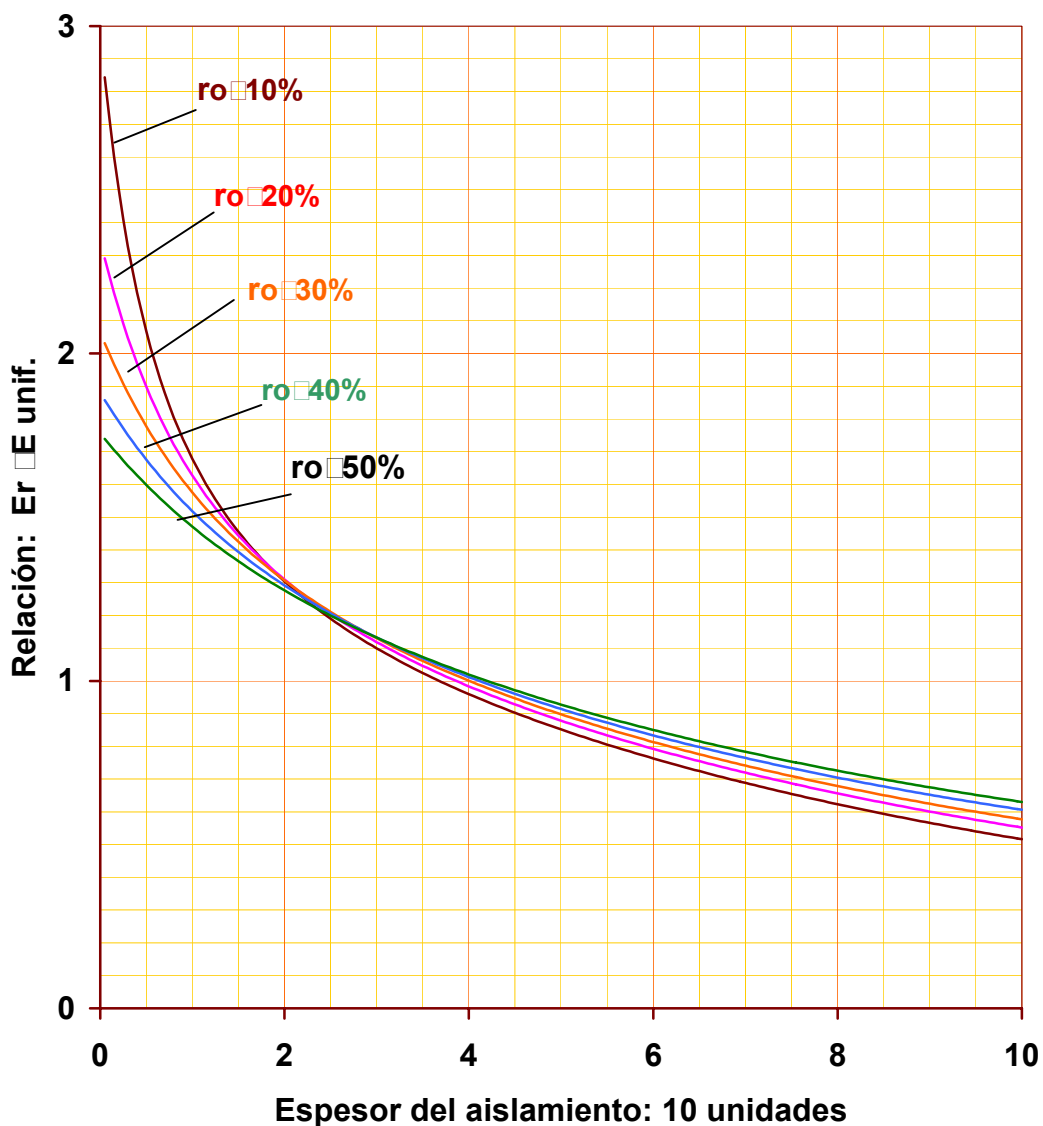


Fig. 3.24. - Gráficas de la Relación obtenida ( Gradiente  $\square$  Gradiente uniforme ) Vs Posición desde el borde del Cobre en los cantos de bobina para Radios del borde del 10, 20, 30, 40 y 50 % del espesor del aislamiento.



**Fig. 3.25. -Gráfica de la Relación (Campo Eléctrico máximo / Campo eléctrico uniforme) vs. Radio del borde del cobre.**

**Curva 1.- Gráfica de la Ec. 1.17 ( Línea cilíndrica coaxial-condensador de electrodos planos).**

**Curva 2.- Resultado evaluado.**

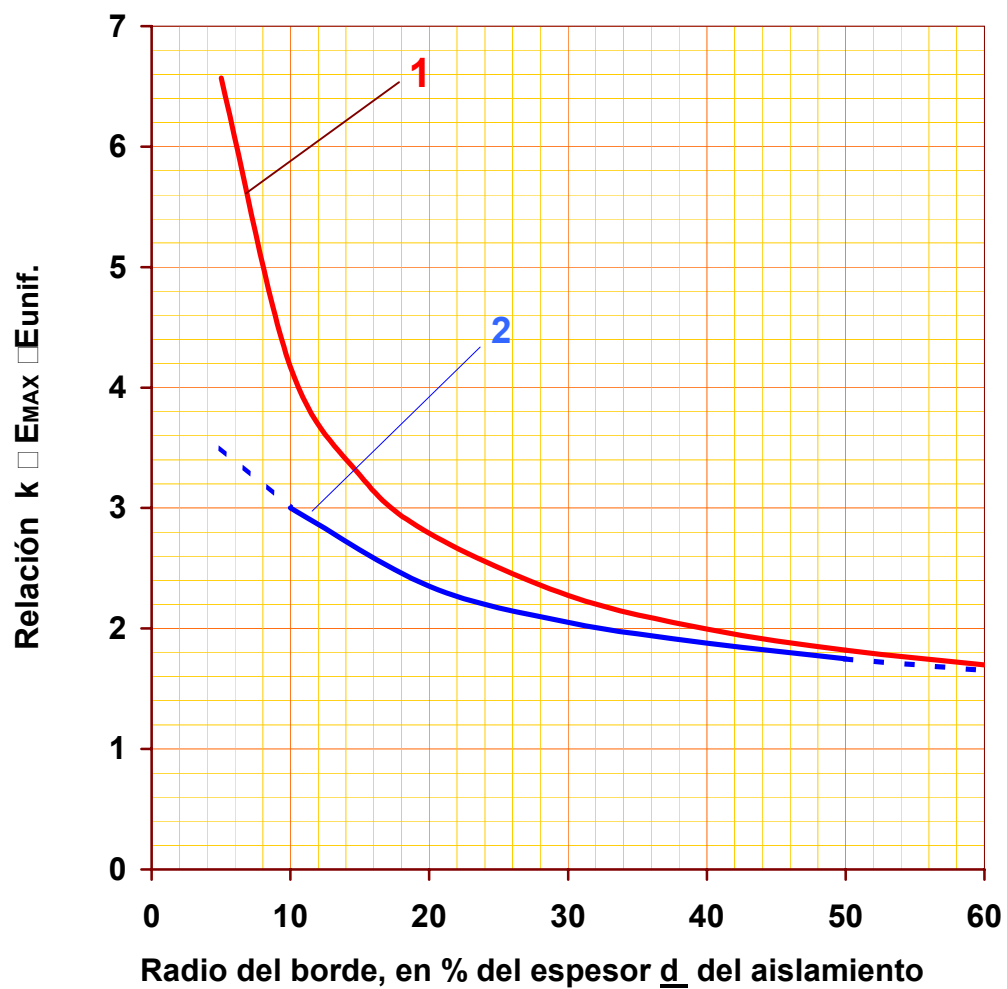


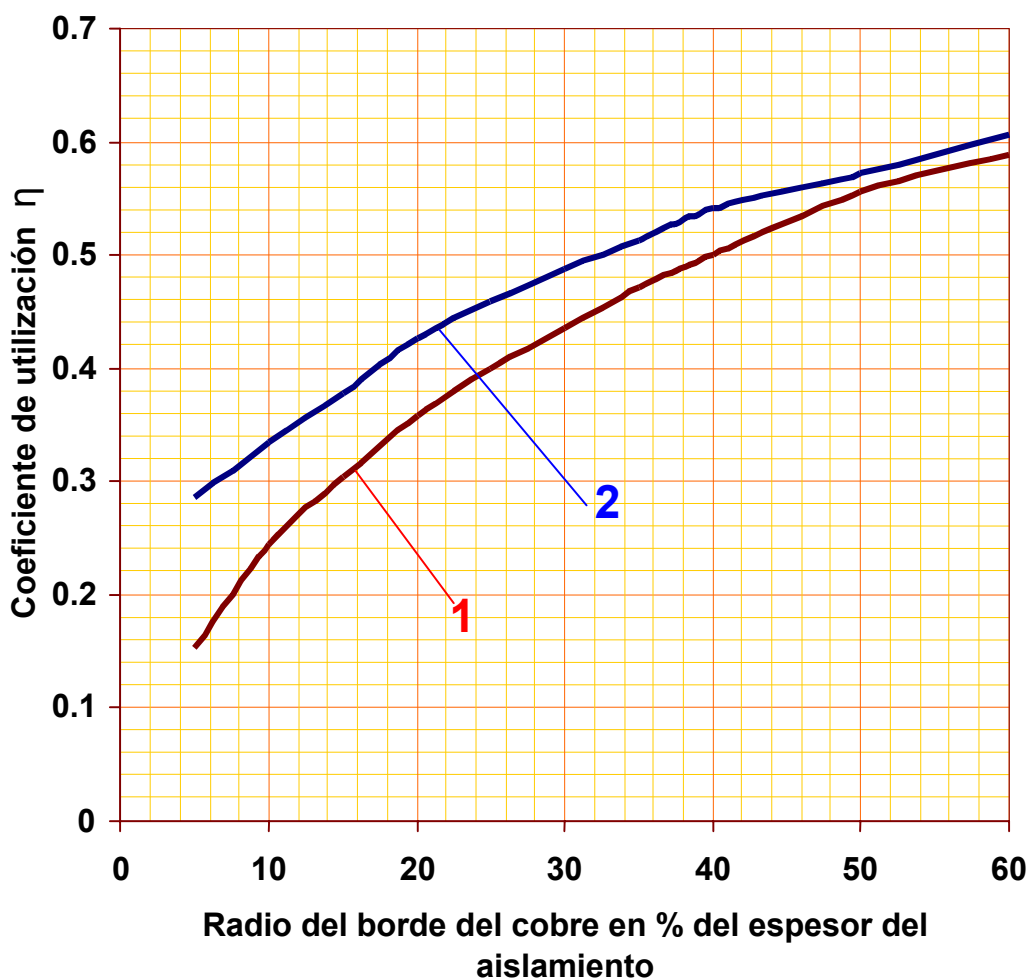


Fig. 3.26. -Coeficiente de utilización  $\eta$ .

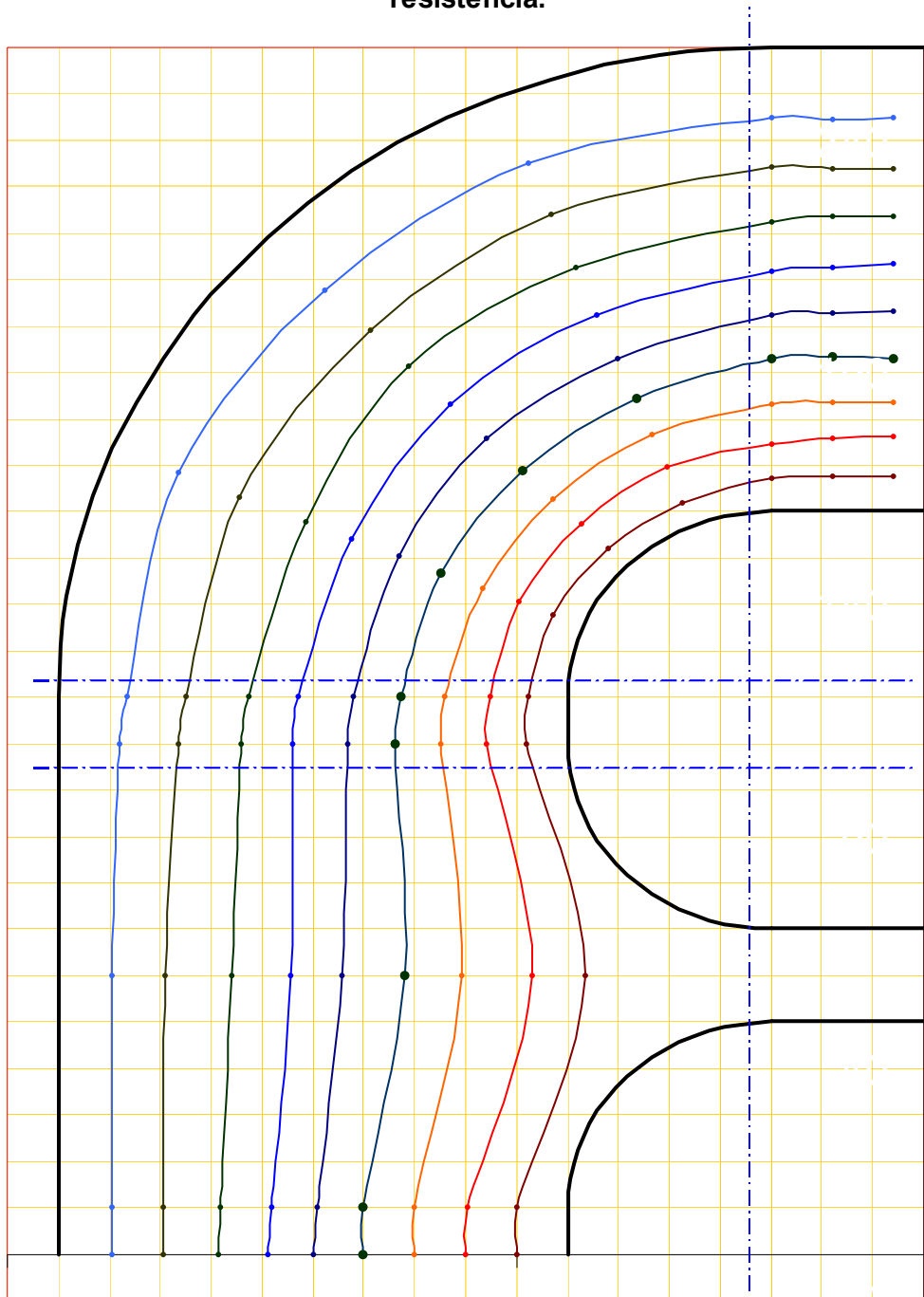
Curva 1. - Caso de una configuración coaxial

Curva 2. - Caso de las bobinas de las máquinas de AT.

(Relación  $1/k = E_{unif} / E_{max}$ )



**Fig. 3.27. -Equipotenciales en la forma de los bordes de una bobina, con radio de bordes del cobre del 40% del espesor del aislamiento, obtenidas por el método de la lámina de resistencia.**



<b>Tensión de máquina kV</b>	Nominal	4	6	10	16
	Normal Fase-tierra	2,3	3,46	5,77	19,23
	De prueba (*) (**)	<b>9</b> <b>18</b>	<b>13</b> <b>26</b>	<b>21</b> <b>42</b>	<b>33</b> <b>66</b>
<b>Espesor del aislamiento en mm</b>		1,3	1,8	2,8	4
<b>Campo eléctrico promedio kV/mm</b>  (Fig. 2.4)	Nominal	3,1	3,3	3,6	4
	Normal Fase-tierra	1,8	1,9	2,1	2,3
	De prueba (*) (**)	<b>6,9</b> <b>13,8</b>	<b>7,2</b> <b>14,4</b>	<b>7,5</b> <b>15</b>	<b>8,3</b> <b>16,6</b>
<b>Factor de seguridad en las paredes laterales</b>	Nominal	11,3	10,6	9,7	8,75
	Normal Fase-tierra	19	18	17	15,2
	De prueba (*) (**)	<b>5,1</b> <b>2,55</b>	<b>4,8</b> <b>2,4</b>	<b>4,6</b> <b>2,3</b>	<b>4,2</b> <b>2,1</b>
<b>Capacidad (C), uF/m<sup>2</sup> de área lateral total de pared</b>		0,031	0,022	0,014	0,010
<b>Corriente a través de la sección lateral de pared de aislamiento mA/m<sup>2</sup></b>	Nominal	46	47	50	54
	Normal	26	27	29	31
	En prueba (*) (**)	105 210	107,8 215,6	110,8 221,6	124 248

**Tabla 3.15. -Parámetros de trabajo del aislamiento de las partes laterales de la sección de ranura de las bobinas de alta tensión**

- Tensión nominal :  $U_N$  (kV)
- Tensión Normal de trabajo del aislamiento:  $U_N / 1,732$   
(tensión de fase o de línea-neutro)
- Tensión de prueba a 60 Hz :  $2 \cdot U_N + 1$  kV (\*)
- Tensión equivalente a 60 Hz de la prueba de impulso transversal [28] :  $2 \cdot (2 \cdot U_N + 1)$  kV (□)
- Corriente a través del aislamiento :  $2 \cdot \pi \cdot f \cdot U \cdot C$
- Rigidez dieléctrica de referencia del aislamiento de mica-epoxy vidrio : 35 kV/mm

<b>Tensión de máquina kV</b>	Nominal ( Un)		<b>6,6</b>			
	Normal ( fase-tierra)		3,81			
	De prueba a 60 Hz	<b>2Un+1</b>	<b>14,2</b>			
		<b>2(2Un+1)</b>	<b>28,4 [28]</b>			
<b>Espesor del aislamiento (mm.)</b>			1,8			
<b>Campo eléctrico medio en kV/ mm</b>	Nominal		3,67			
	Normal (fase-tierra)		2,12			
	De prueba	<b>2Un+1</b>	7,89			
		<b>2(2Un+1)</b>	<b>15,78</b>			
<b>Radio de los bordes del conductor (mm / % del espesor del aislamiento).</b>			0,3	0,6	0,9	1,0
			17%	33%	50%	55%
<b>Relación Emax/Emed. En los bordes de bobina</b>	(*)		3,08	2,16	1,82	1,75
	(**)		2,65	2,0	1,75	1,70
<b>Campo eléctrico máximo en los bordes de la Sección de bobina ( kV/mm)</b>	Nominal		9,72	7,33	6,42	6,23
	Normal		5,61	4,23	3,70	3,60
	De prueba	<b>2Un+1</b>	<b>20,91</b>	<b>15,78</b>	<b>13,81</b>	<b>13,41</b>
		<b>2(2Un+1)</b>	<b>41,82</b>	<b>31,56</b>	<b>27,62</b>	<b>26,82</b>
<b>Factor de seguridad en los Bordes</b>	Nominal		3,6	4,77	5,45	5,61
	Normal		6,24	8,27	9,45	9,73
	De prueba	<b>2Un+1</b>	<b>1,67</b>	<b>2,22</b>	<b>2,54</b>	<b>2,61</b>
		<b>2(2Un+1)</b>	<b>0,84</b>	<b>1,1</b>	<b>1,27</b>	<b>1,31</b>
<b>Suma de la capacidad de los 4 bordes en la parte activa nF/m</b>			0,14	0,20	0,25	0,27
<b>Corriente (60Hz) tomada por la capacidad de los 4 bordes en la parte activa en mA/m</b>	Nominal		0,36	0,50	0,63	0,67
	Normal		0,21	0,29	0,36	0,39
	De prueba	<b>2Un+1</b>	0,76	1,07	1,35	1,45
		<b>2(2Un+1)</b>	1,52	2,14	2,7	2,9

**Tabla 3.16. -Parámetros de trabajo del aislamiento en los bordes de la sección de ranura de las bobinas del nivel de tensión de 6,6 kV**

(\*) Calculado según la Ec. No. 1.17 (curva 1 de la Fig. 3.25)

(\*\*) Evaluado según la curva 2 de la Fig. 3.25

Rigidez dieléctrica del aislamiento de referencia: 35 kV/ mm

<b>Tensión de máquina kV</b>	Nominal ( Un )		<b>10</b>			
	Normal ( fase-tierra )		5,77			
	De prueba a 60 Hz	<b>2Un+1</b>	<b>21</b>			
		<b>2(2Un+1)</b>	<b>42</b>	<b>[28]</b>		
<b>Espesor del aislamiento (mm.)</b>			3,0			
<b>Campo eléctrico medio en kV/mm</b>	Nominal		3,33			
	Normal (fase-tierra)		1,92			
	De prueba	<b>2Un+1</b>	<b>7,0</b>			
		<b>2(2Un+1)</b>	<b>14,0</b>			
<b>Radio de los bordes del conductor (mm / % del espesor del aislamiento).</b>			0,3	0.6	1.0	1.5
			10%	20%	33%	50%
<b>Relación Emax/Emed. En los bordes de bobina</b>	(*)		4,17	2,79	2,2	1,82
	(**)		3,0	2,4	2,0	1,7
<b>Campo eléctrico máximo en los bordes de la Sección de bobina ( kV/mm )</b>	Nominal		10	8,0	6,66	5,67
	Normal		5,77	4,62	3,84	3,27
	De prueba	<b>2Un+1</b>	<b>21</b>	<b>16,8</b>	<b>14</b>	<b>11,9</b>
		<b>2(2Un+1)</b>	<b>42</b>	<b>33,6</b>	<b>28</b>	<b>23,8</b>
<b>Factor de seguridad en los Bordes</b>	Nominal		3,50	4,38	5,25	6,18
	Normal		6,06	7,58	9,11	10,70
	De prueba	<b>2Un+1</b>	<b>1,67</b>	<b>2,08</b>	<b>2,5</b>	<b>2,94</b>
		<b>2(2Un+1)</b>	<b>0.84</b>	<b>1,04</b>	<b>1,25</b>	<b>1,47</b>
<b>Suma de la capacidad de los 4 bordes en la parte activa nF/m</b>			0,12	0,16	0,20	0,25
<b>Corriente (60Hz) tomada por la capacidad de los 4 bordes en la parte activa en mA/m</b>	Nominal		0,44	0,58	0,76	0,95
	Normal		0,25	0,34	0,44	0,55
	De prueba	<b>2Un+1</b>	0,92	1,23	1,59	2,00
		<b>2(2Un+1)</b>	1,84	2,46	3,18	4,0

**Tabla 3.17. – Parámetros de trabajo del aislamiento en los bordes de la sección de ranura de las bobinas del nivel de tensión de 10 kV.**

(\*) Calculado según la Ec. No. 1.17 (curva 1 de la Fig. 3.25)

(\*\*) Evaluado según la curva 2 de la Fig. 3.25

Rigidez dieléctrica del aislamiento de referencia: 35 kV/ mm

<b>Tensión de máquina kV</b>	Nominal ( Un )		13,8			
	Normal ( fase-tierra )		7,97			
	De prueba a 60 Hz	<b>2Un+1</b>	<b>28,6</b>			
		<b>2(2Un+1)</b>	<b>57,2 [28]</b>			
<b>Espesor del aislamiento (mm.)</b>			4,0			
<b>Campo eléctrico medio en kV/mm</b>	Nominal		3,45			
	Normal (fase-tierra)		1,99			
	De prueba	<b>2Un+1</b>	7,15			
		<b>2(2Un+1)</b>	<b>14,3</b>			
<b>Radio de los bordes del conductor (mm / % del espesor del aislamiento).</b>			0,5	0,9	1,5	2,0
			12,5%	22%	38%	50%
<b>Relación Emax/Emed. En los bordes de bobina</b>	(*)		3,64	2,62	2,05	1,82
	(**)		2,8	2,25	1,9	1,75
<b>Campo eléctrico máximo en los bordes de la Sección de bobina ( kV/mm )</b>	Nominal		9,66	7,76	6,56	6,04
	Normal		5,58	4,48	3,78	3,49
	De prueba	<b>2Un+1</b>	<b>20,0</b>	<b>16,1</b>	<b>13,6</b>	<b>12,5</b>
		<b>2(2Un+1)</b>	<b>40</b>	<b>32,2</b>	<b>27,2</b>	<b>25</b>
<b>Factor de seguridad en los Bordes</b>	Nominal		3,62	4,51	5,34	5,8
	Normal		6,28	7,81	9,25	10,04
	De prueba	<b>2Un+1</b>	<b>1,75</b>	<b>2,18</b>	<b>2,58</b>	<b>2,8</b>
		<b>2(2Un+1)</b>	<b>0,9</b>	<b>1,09</b>	<b>1,29</b>	<b>1,4</b>
<b>Suma de la capacidad de los 4 bordes en la parte activa nF/m</b>			0,13	0,16	0,21	0,25
<b>Corriente (60Hz) tomada por la capacidad de los 4 bordes en la parte activa en mA/m</b>	Nominal		0,66	0,85	1,11	1,32
	Normal		0,38	0,49	0,64	0,76
	De prueba	<b>2Un+1</b>	1,36	1,77	2,31	2,73
		<b>2(2Un+1)</b>	2,72	3,54	4,62	5,46

**Tabla 3.18. – Parámetros de trabajo del aislamiento en los bordes de la Sección de ranura de las bobinas del nivel de tensión de 13,8 kV**

(\*) Calculado según la Ec. No. 1.17 (curva 1 de la Fig. 3.25)

(\*\*) Evaluado según la curva 2 de la Fig. 3.25

Rigidez dieléctrica del aislamiento de referencia: 35 kV/ mm

<b>Tensión de máquina kV</b>	Nominal ( Un)		21			
	Normal ( fase-tierra)		12,1			
	De prueba a 60 Hz	<b>2Un+1</b>	<b>43</b>			
		<b>2(2Un+1)(***)</b>	<b>86</b>			<b>[28]</b>
<b>Espesor del aislamiento (mm.)</b>			6,0			
<b>Campo eléctrico medio en kV/mm</b>	Nominal		3,5			
	Normal (fase-tierra)		2,02			
	De prueba	<b>2Un+1</b>	7,17			
		<b>2(2Un+1)(***)</b>	<b>14,33</b>			
<b>Radio de los bordes del conductor (mm / % del espesor del aislamiento).</b>			0,6	1.2	1.8	3.0
			10%	20%	30%	50%
<b>Relación Emax/Emed. En los bordes de bobina</b>	(*)		4,17	2.79	2.27	1.82
	(**)		3,0	2.4	2.05	1.75
<b>Campo eléctrico máximo en los bordes de la Sección de bobina ( kV/mm)</b>	Nominal		10,50	8.40	7.18	6.13
	Normal		6,06	4,85	4,14	3,54
	De prueba	<b>2Un+1</b>	<b>21,5</b>	<b>17,20</b>	<b>14,69</b>	<b>12,54</b>
		<b>2(2Un+1)(***)</b>	<b>43</b>	<b>34,4</b>	<b>29,38</b>	<b>25,08</b>
<b>Factor de seguridad en los Bordes</b>	Nominal		3,33	4,17	4,88	5,71
	Normal		5,77	7,22	8,45	9,90
	De prueba	<b>2Un+1</b>	<b>1,63</b>	<b>2,03</b>	<b>2,38</b>	<b>2,79</b>
		<b>2(2Un+1)(***)</b>	<b>0,8</b>	<b>1,02</b>	<b>1,2</b>	<b>1,4</b>
<b>Suma de la capacidad de los 4 bordes en la parte activa nF/m</b>			0,12	0,16	0,19	0,25
<b>Corriente (60Hz) tomada por la capacidad de los 4 bordes en la parte activa en mA/m</b>	Nominal		0,92	1,23	1,50	2,00
	Normal		0,53	0,71	0,87	1,16
	De prueba	<b>2Un+1</b>	1,88	2,52	3,07	4,10
		<b>2(2Un+1)(***)</b>	3,76	5,04	6,14	8,2

**Tabla 3.19. – Parámetros de trabajo del aislamiento en los bordes de la sección de ranura de las bobinas del nivel de tensión de 21 kV.**

- (\*) Calculado según la Ec. No. 1.17 (curva 1 de la Fig. 3.25)  
(\*\*) Evaluado según la curva 2 de la Fig. 3.25  
(\*\*\*) Este nivel de tensión no está especificado en la Tabla I de [28]  
Rigidez dieléctrica del aislamiento de referencia: 35 kV/ mm

<b>Tensión de máquina kV</b>	Nominal ( Un)		<b>27</b>			
	Normal ( fase-tierra)		15,59			
	De prueba a 60 Hz	<b>2Un+1</b>	<b>55</b>			
		<b>2(2Un+1) (***)</b>	<b>(110 ) [28]</b>			
<b>Espesor del aislamiento (mm.)</b>			6,5			
<b>Campo eléctrico medio en kV/mm</b>	Nominal		4,15			
	Normal (fase-tierra)		2,40			
	De prueba	<b>2Un+1</b>	<b>8,46</b>			
		<b>2(2Un+1)(***)</b>	<b>(16,92)</b>			
<b>Radio de los bordes del conductor (mm / % del espesor del aislamiento).</b>			<b>0,6</b>	1,5	2,0	<b>3,0</b>
			10%	23%	30%	45%
<b>Relación Emax/Emed. En los bordes de bobina</b>	(*)		4,38	2,59	2,25	1,88
	(**)		<b>3,00</b>	2,4	2,05	<b>1,8</b>
<b>Campo eléctrico máximo en los bordes de la Sección de bobina ( kV/mm)</b>	Nominal		12,46	9,97	8,52	7,48
	Normal		7,19	5,76	4,92	4,32
	De prueba	<b>2Un+1</b>	<b>25,38</b>	<b>20,31</b>	<b>17,35</b>	<b>15,23</b>
		<b>2(2Un+1) (***)</b>	50,76	40,62	34,70	30,46
<b>Factor de seguridad en los Bordes</b>	Nominal		3,50	4,38	5,12	6,18
	Normal		6,06	7,58	8,87	10,70
	De prueba	<b>2Un+1</b>	<b>1,67</b>	<b>2,08</b>	<b>2,44</b>	<b>2,94</b>
		<b>2(2Un+1)(***)</b>	<b>0,84</b>	1,04	1,27	<b>1,31</b>
<b>Suma de la capacidad de los 4 bordes en la parte activa nF/m</b>			0,11	0,17	0,19	0,24
<b>Corriente (60Hz) tomada por la capacidad de los 4 bordes en la parte activa en mA/m</b>	Nominal		1,15	1,69	1,96	2,46
	Normal		0,66	0,98	1,13	1,42
	De prueba	<b>2Un+1</b>	2,33	3,44	3,98	5,0
		<b>2(2Un+1)(***)</b>	4,66	6,88	7,96	10,0

**Tabla 3.20. – Parámetros de trabajo del aislamiento en los bordes de la sección de ranura de las bobinas del nivel de tensión de 27 kV**

(\*) Calculado según la Ec. No 1.17 (curva 1 de la Fig. 3.25)

(\*\*) Evaluado según la curva 2 de la Fig. 3.25

(\*\*\*) Este nivel de tensión no está indicado en la Tabla I de [28]

Rigidez dieléctrica del aislamiento de referencia: 35 kV/ mm



<b>Tensión de máquina kV</b>	Nominal ( Un)		<b>40</b>			
	Normal ( fase-tierra)		23.09			
	De prueba a 60 Hz	<b>2Un+1</b>	<b>81</b>			
<b>2(2Un+1) (***)</b>		<b>(162)</b>	<b>[28]</b>			
<b>Espesor del aislamiento (mm.)</b>			8,.0			
<b>Campo eléctrico medio en kV/mm</b>	Nominal		3,33			
	Normal (fase-tierra)		1,92			
	De prueba	<b>2Un+1</b>	<b>7,0</b>			
<b>2(2Un+1) (***)</b>		<b>(14,0)</b>				
<b>Radio de los bordes del conductor (mm / % del espesor del aislamiento).</b>			<b>3 [14]</b>	3.5	4	<b>5 [14]</b>
			38%	44%	50%	63%
<b>Relación Emax/Emed. En los bordes de bobina</b>	(*)		2,05	1,92	1,82	1,67
	(**)		1,9	1,8	1,75	1,6
<b>Campo eléctrico máximo en los bordes de la Sección de bobina ( kV/mm)</b>	Nominal		9,50	9,00	8,75	8,00
	Normal		5,48	5,20	5,05	4,62
	De prueba	<b>2Un+1</b>	<b>19,24</b>	<b>18,23</b>	<b>17,72</b>	<b>16,2</b>
<b>2(2Un+1)(***)</b>		<b>38,48</b>	<b>36,46</b>	<b>35,44</b>	<b>32,4</b>	
<b>Factor de seguridad en los Bordes</b>	Nominal		3,68	3,89	4,0	4,38
	Normal		6,38	6,74	6,93	7,58
	De prueba	<b>2Un+1</b>	<b>1,82</b>	<b>1,92</b>	<b>1,98</b>	<b>2,16</b>
<b>2(2Un+1)(***)</b>		<b>0,91</b>	<b>0,91</b>	<b>0,94</b>	<b>1,08</b>	
<b>Suma de la capacidad de los 4 bordes en la parte activa nF/m</b>			0,21	0,23	0,25	0,29
<b>Corriente (60Hz) tomada por la capacidad de los 4 bordes en la parte activa en mA/m</b>	Nominal		3,23	3,52	3,82	4,39
	Normal		1,86	2,03	2,20	2,53
	De prueba	<b>2Un+1</b>	6,53	7,14	7,73	8,89
<b>2(2Un+1)(***)</b>		13,06	14,28	15,46	17,78	

**Tabla 3.21. – Parámetros de trabajo del aislamiento en los bordes de la sección de ranura de las bobinas del nivel de tensión de 40 kV**

- (\*) Calculado según la Ec. No. 1.17 (curva 1 de la Fig. 3.25) [14]
- (\*\*) Evaluado según la curva 2 de la Fig. 3.25
- (\*\*\*) Este nivel de tensión no está indicado en la Tabla I de [28]  
Rigidez dieléctrica del aislamiento de referencia: 35 kV/ mm

**3.4. -Evaluación experimental del factor de seguridad en la parte activa de las bobinas de AT con aislamiento de mica-epoxy, de acuerdo al criterio de campo eléctrico en los bordes.-** Con el objeto de verificar el factor de seguridad del aislamiento en la parte activa de las bobinas con aislamiento de mica-epoxy, determinamos:

- La rigidez dieléctrica del material aislante ( $E_p$ ) en muestras consolidadas de sección plana, efectuando los ensayos de rotura con un espinterometro disponible que usa electrodos semiesféricos VDE de 25 mm de diámetro, sumergidos en aceite dieléctrico.
- La rigidez dieléctrica del material aislante ( $E_p$ ) en muestras con forma de línea coaxial con una relación  $E_{max}/E_{med}$  de 1.1 aproximadamente, es decir cercana a la unidad, simulando una distribución de campo eléctrico y de equipotenciales casi uniforme como si fuera en un condensador de electrodos planos.
- La rigidez dieléctrica del material aislante ( $E_p$ ) en muestras con forma de línea coaxial con una relación de diámetros del conductor exterior al conductor interior, de diferentes valores como los que se pueden encontrar en los bordes de las bobinas usuales, con el objeto de verificar el campo eléctrico de rotura en esas condiciones.
- Estos ensayos han sido realizados a temperatura ambiente.

El factor de seguridad al efectuar los ensayos de tensión aplicada se determinara según el radio de bordes del conductor utilizado, haciendo uso del grafico No. 3.25 y del valor promedio de referencia ( $V/d$ ) del campo eléctrico aplicado.

$E_p$  = Rigidez dieléctrica, kV/ mm

$U_t$  = Tensión de prueba (kV)

$d$  = Espesor del aislamiento (mm)

$k$  = Relación  $E_{MAX}/E_{medio}$  en bordes, según la Fig. 3.25, o la Ec. 1.17

$\eta$  = Coeficiente de utilización (  $1/k$ ) según la fig. 3.26

$\alpha$  = Espesor o distancia ficticia del aislamiento

$$F_s = \frac{E_p}{\left(\frac{U_t}{d}\right) \cdot k} = \frac{E_p \cdot d}{U_t \cdot k} = \frac{E_p \cdot d \cdot \eta}{U_t} = \frac{E_p \cdot \alpha}{U_t} \quad \text{Ec. 3.7}$$

**3.4.1. - Esfuerzo de rotura del material aislante.** - En la tabla No. 3.22 se muestran los resultados del ensayo de rotura (prueba rápida en aceite) efectuadas en tres muestras con forma de placas, preparadas con cinta de mica epoxy de clase F.- En cada muestra se efectuaron cuatro descargas en puntos diferentes.- Al efectuar esta prueba, se está simulando lo que ocurre en el aislamiento de las partes laterales en la parte activa las bobinas.- La prueba se ha efectuado a temperatura ambiente.

El fabricante de este material aislante, en su hoja técnica, indica que éste papel de mica (papel de mica-epoxy-vidrio) posee una rigidez dieléctrica, después de 4 horas de prensado en caliente, de  $\geq 35$  kv/mm a 23 °C y de  $\geq 30$  kv/mm a 150 °C. – El resultado que se indica en la tabla 3.22 confirma lo afirmado por el fabricante en su hoja técnica respecto a la rigidez dieléctrica del material a temperatura ambiente.

<b>Norma de referencia:</b>			ASTM D149-97a. [53]	
<b>Electrodos</b>			VDE, semiesféricos de 25 mm de diámetro	
<b>Medio</b>			Aceite dieléctrico con rigidez de 160 kV/cm	
<b>Equipo utilizado</b>			Espinterómetro Digital marca Hipotronics	
<b>Velocidad de incremento de tensión</b>			500 voltios/seg	
<b>Muestra</b>	<b>Espesor (mm)</b>	<b>Descarga No. (□)</b>	<b>Tensión de descarga (kV)</b>	<b>Esfuerzo de rotura kV/mm</b>
<b>1</b>	0,84	1	31,4	37,38
		2	28,2	33,57
		3	29,6	35,23
		4	32,1	38,21
<b>2</b>	0,93	1	33,3	35,81
		2	32,4	34,83
		3	32,1	34,51
		4	33,4	35,91
<b>3</b>	1,1	1	35,2	32,00
		2	39,0	35,45
		3	36,2	32,90
		4	39,8	36,18
Rigidez dieléctrica (kV/mm)				<b>35,16</b>
Desviación standard (kV/mm)				1,69

**Tabla 3.22. -Rigidez dieléctrica de tres muestras de papel de mica epoxy en forma de placas planas**

**3.4.2. - Esfuerzo de rotura del papel de mica epoxy aplicado a muestras en forma de línea coaxial.** - Lo que se muestra a continuación es el resultado del ensayo de rotura del papel de mica-epoxy-vidrio aplicado como aislamiento en muestras con forma de línea coaxial, con una relación entre los campos eléctricos máximo y promedio,  $E_{max}/E_{med}$  de 1.1 aproximadamente, es decir cercana a la unidad, o sea con la magnitud del diámetro del conductor interior cercano a la del

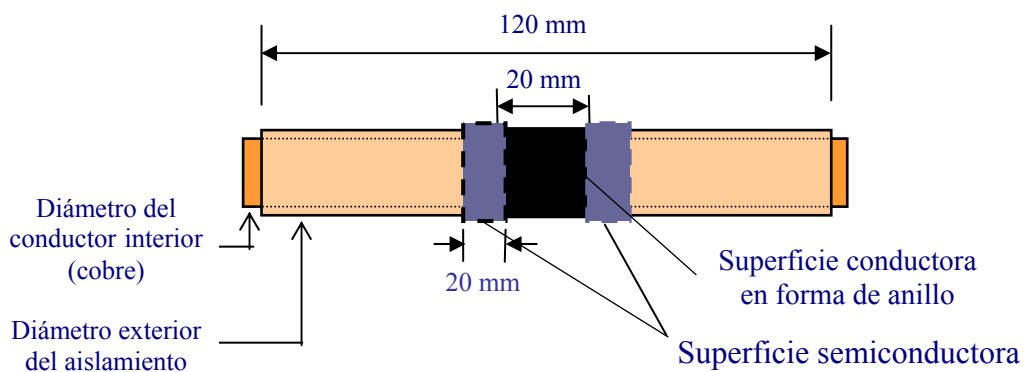
diámetro del conductor exterior, simulando una distribución de campo eléctrico y de equipotenciales casi uniforme como si fuera en un condensador de electrodos planos. La forma de las muestras es como lo indica la Fig. No. 3.28 siguiente.- En ellas se ha dispuesto dos anillos semiconductores para suavizar el gradiente de campo eléctrico en el aislamiento en la zona de los bordes del anillo conductor exterior.- La prueba se realiza en aceite dieléctrico para evitar las descargas superficiales en el aire.- En la tabla 3.23 siguiente se muestra el resultado de estas pruebas.

**3.4.3. - Determinación analógica del esfuerzo de rotura en los bordes de las bobinas.** -Tal como se ha indicado en el capítulo II, al identificar las configuraciones capacitivas en los diferentes sectores de las bobinas, en los bordes de la parte activa (parte recta alojada en las ranuras) de las mismas, se presenta un sector de 90° de línea de conductores cilíndricos coaxiales, y de lo analizado en la primera parte de éste capítulo y que se resume en la configuración de las equipotenciales en los bordes del aislamiento de las bobinas y en la Figura 3.25, podemos concluir que el comportamiento del dieléctrico de una bobina en la parte activa lo podemos estudiar experimentalmente, mejor en forma separada, en muestras que tengan la forma de una línea coaxial de conductores cilíndricos, que representen a los bordes de la bobina, separando así la influencia de las partes laterales- lo cual en si, es un estudio analógico- y observando lo que ocurre, solo en lo que representa al borde, que es donde las corrientes aparentemente pequeñas, pueden ser ya de falla respecto de la magnitud de las corrientes en las partes laterales que son comparativamente grandes, por corresponder a capacidades mucho más grandes, pero que simultáneamente trabajan sometidos a esfuerzos dieléctricos de menos de la mitad de lo que

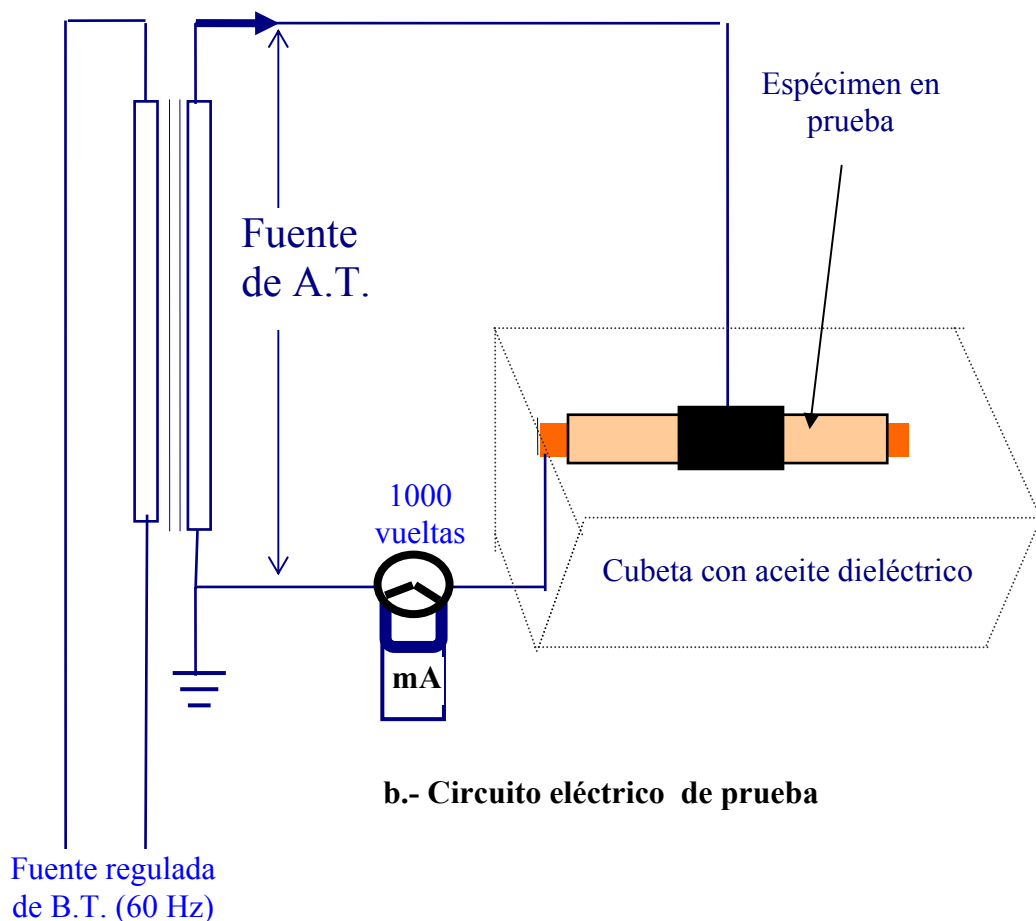
corresponde a los bordes.- Al aplicar luego estos conceptos obtenidos en probetas de tipo cilíndrico coaxial, al aislamiento de las bobinas reales, esas características son las mismas lo cual se comprueba en bobinas reales, sólo que es muchísimo más costoso.

En la tabla 3.29 se resume el resultado de estas pruebas y se muestra, cómo el dieléctrico utilizado, siempre falla en promedio con el mismo nivel de campo eléctrico aplicado, de alrededor de 35 kV/mm, que es el mismo nivel de sostenimiento dieléctrico que se ha determinado con lo indicado en los apartados 3.4.1 y 3.4.2. - Queda claro pues, que el valor que debe observarse al aplicar un determinado nivel de tensión a una configuración dada es el esfuerzo dieléctrico en el punto “caliente” que es en los bordes, y su observación, para el que presencia una prueba, no es directa y menos el factor de seguridad en prueba.

A partir de ésta información puede manejarse el diseño del aislamiento a tierra de las bobinas en vista a las exigencias de la aplicación de la norma IEC 34-15 o la IEEE 792, utilizando conductores de cobre aislados con cintas de mica de alta rigidez dieléctrica consolidados y efectuando algún tipo de graduación de la rigidez del aislamiento junto al paquete de conductores, ya sea utilizando aislamientos con respaldo de filmes de alta rigidez dieléctrica que incrementan el camino de rotura, pudiendo lograrse tensiones de rotura iniciales del orden de los 50 kV para el nivel de 6,6 kV.



**a.- Esquema de los especímenes de prueba para determinar la rigidez dieléctrica del papel de mica aplicado a una línea coaxial.**



**b.- Circuito eléctrico de prueba**

**Fig. 3.28. – a. - Esquema de las probetas de prueba.  
b.- Esquema eléctrico para el ensayo de rotura del aislamiento de las muestras en forma de línea coaxial (Tablas 3.23 y 3.24)**

Tensión	Corriente de dispersión $I_{AC}$ ( $\mu$ A) a 60 Hz				
	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Muestra 4	Muestra 5
5	56	68	69	55	52
7	99	100	99	85	88
9	141	139	149	120	123
13	253	235	252	194	210
15	303	310	297	259	250
17	361	350	350	299	306
21	485	456	438	365	400
23	551	502	494	417	451
25	627	566	553	470	501
27	693	613	609	518	564
31	830	730	780	678	658
33	915	795	863	765	725
35	1025	900	930	814	785
37	1330	970	1150	936	852
39	1490		1300	974	900
41			1980	1140	1000
43				1360	1068
45				1630	1153
47				1830	1320
Intervalo de tiempo entre incrementos de tensión: 10 Seg.					
<b>Resumen</b>					
	<b>Muestra No.</b>				
	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>
<b>Tensión de descarga ( kV)</b>	39	37	41	47	47
<b>Diámetro. del aislamiento (mm)</b>	13,5	13,5	13,5	14	14
<b>Diámetro del cobre (mm)</b>	11	11	11	11	11
<b>Espesor del aislamiento (mm)</b>	1,25	1,25	1,25	1,5	1,5
<b>Relación <math>E_{max}/E_m</math>:</b>	1,11	1,11	1,11	1,13	1,13
<b><math>E_{max}</math>. (kV/mm)</b>	<b>34,62</b>	<b>32,85</b>	<b>36,40</b>	<b>35,43</b>	<b>35,43</b>
<b><math>E_{max}</math>. promedio ( kV/mm).</b>	<b>34,95</b>				
<b>Valor mínimo del campo eléctrico máximo: <math>E_{max}</math>. ( Míximo). (kV/mm).</b>	<b>32,85</b>				

Tabla 3.23. - Característica de la corriente de dispersión y de la rigidez dieléctrica de cinco muestras en forma de línea coaxial, Fig. 3.28.a, con aislamiento de papel de mica-epoxy-vidrio. [53]



Característica	Tipo de muestra				
	Muestras tipo 1	Muestras tipo 2	Muestras tipo 3	Muestras tipo 4	Muestras tipo 5
Diámetro interior (d) mm.	0,62	0,72	1,45	1,92	2,32
Diámetro exterior (D) mm	4,7	4,7	5,6	5,9	6,6
Espesor del aislamiento (mm)	2,04	1,99	2,075	1,99	2,14
Longitud del conductor exterior mm	20	20	20	20	20
Relación $E_M / E_m$ ( campo eléctrico máximo / campo eléctrico promedio)	3,24	2,94	2,11	1,84	1,76
Tensiones de descarga medidas (kV)	24 22 20 24 21 23	28 24 24	35 41 37	38 40 39	40 45 40 44 51
Tensión de descarga promedio (kV)	22,33	25,33	37,66	39	44
Valor promedio del campo eléctrico medio en la ruptura (kV/mm)	10,94	12,73	18,15	19,5	20,56
Valor promedio del campo eléctrico máximo, $E_M$ (kV/mm)	35.44	37.42	38.29	35.88	36.19
Valor promedio del Campo eléctrico Máximo de ruptura $E_M$ (kV/mm)	<b>36.6</b>				

Tabla 3.24. -Resumen de las pruebas efectuadas con las muestras en forma de línea coaxial con aislamiento de mica-epoxy-vidrio con varios diámetros del conductor interior y espesor del aislamiento de 2 mm.

( Norma: ASTM D 149-97a. [53] )

**3.5. –Tratamiento del aislamiento entre espiras, conceptos generales.** - El diseño del aislamiento del bobinado de los estatores de AC debe tomar en consideración a las tensiones de operación de estado estable y a las tensiones transitorias (oscilaciones de sobre-tensión) causadas por factores tales como el impacto de rayos y los fenómenos de switching.- Ambos tipos de sobretensiones, esfuerzan el aislamiento contra masa y si la sobretensión tiene la subida del frente de onda lo suficientemente empinado, también sobreesfuerza al aislamiento entre espiras.

Como se ha mostrado en la Figs. 1.6, las normas cuantifican el nivel de las sobretensiones refiriéndose al valor de cresta de la tensión nominal contra masa como uno por unidad, o sea que:

$$1 \text{ p.u} = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \times \text{Tension Nominal} \quad \text{Ec. 3.8}$$

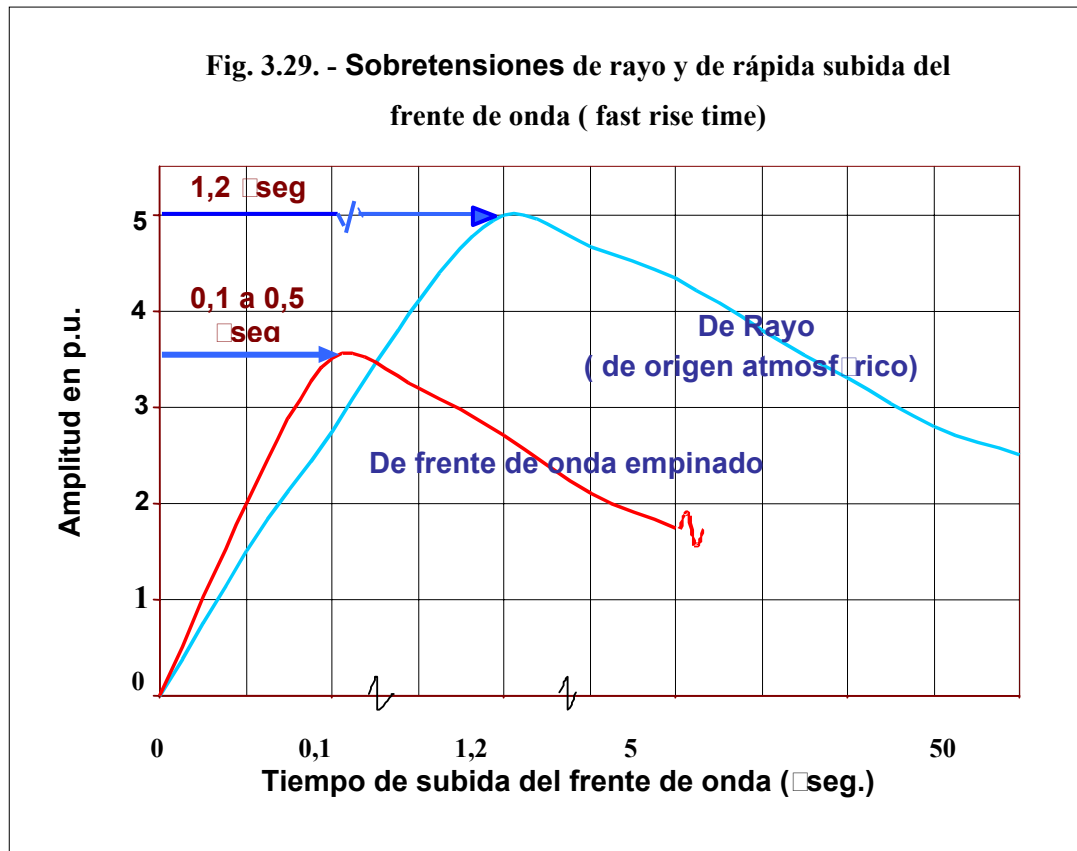
Las sobretensiones de frente empinado, con magnitudes tan altas como de 4.5 p.u. y tiempos de subida del frente de onda de 0,1 a 0,2  $\mu$ s son posibles durante la operación normal de los interruptores por las reflexiones de la onda de sobretensión generada por la interrupción de la corriente entre el polo que se abre de un interruptor, la impedancia del cable y la impedancia de onda del bobinado del estator de una máquina AC (fenómenos de switching o sobretensiones oscilatorias de maniobra).

Los estándares hacen una distinción entre los impulsos y las sobretensiones transitorias o surges [29]. - Los impulsos son transitorios aperiódicos de tensión o corriente aplicados intencionalmente y que usualmente, crecen rápidamente hasta su valor pico y entonces, decaen más lentamente hasta cero; los *surges* son

sobretensiones transitorias que ocurren en el equipamiento eléctrico en servicio. - Principalmente, hay dos clases de sobretensiones transitorias, aquellas originadas por la caída de los rayos y las causadas por los fenómenos de switching. -Los estándares también hacen una distinción sobre la base de la duración del tiempo de subida del frente de onda, desde cero hasta alcanzar el valor pico. -Los surges con frentes de onda de hasta 20  $\mu$ s son definidos como sobretensiones de origen atmosférico, y aquellas con frentes de onda más largos, se definen como sobretensiones de maniobra o de switching [50]

**3.5.1. -Forma de las sobretensiones transitorias.** -El tiempo de subida del frente de onda, la amplitud y el tiempo de decaimiento pueden variar enormemente; por lo tanto ha sido necesario definir estas sobretensiones mediante medios relativamente simples, para los propósitos de simulación y pruebas. - La onda de sobretensión de rayo standard es definida [22], [29], [39], [50] como una que tenga un tiempo virtual de subida del frente de onda de 1,2  $\mu$ s y de un tiempo de decaimiento hasta la mitad de su valor de 50  $\mu$ s.- Un transitorio de frente empinado, es uno con un tiempo de aparición del frente de onda de 0,1 a 0,5  $\mu$ s y de un tiempo de decaimiento del frente de onda hasta la mitad de su valor de alrededor de 5  $\mu$ s ( Fig. 3.35)

La amplitud y tiempo de subida de las sobretensiones que alcanzan los terminales de las máquinas rotativas AC, dependen del evento a que tiene lugar, del nivel de tensión de operación, de las características de todos los dispositivos del sistema, del diseño de los bobinados y del motor mismo.- En este aspecto se conoce que son importantes los siguientes factores:



- El tipo de transitorio: Sobretensiones de origen atmosférico no debidamente controladas, operación normal de apertura o de cierre de interruptores, arranque normal, arranque abortado, etc.
- Las características de la capacitancia y de la impedancia de onda del bobinado de la máquina rotativa y de sus circuitos en paralelo internos.
- Las características del cable de conexión, de su impedancia y de sus pérdidas
- El tipo de interruptores, al aire, de soplado magnético, al vacío, SF<sub>6</sub>, etc.
- Tamaño de la barra de suministro y de las cargas y número de éstas conectadas a la barra.

La combinación de estos factores puede atenuar o amplificar el nivel así como el tiempo de subida del frente de onda de las sobretensiones que alcanzan al bobinado

del estator de una máquina AC, dependiendo mucho del tamaño de la máquina y de la longitud y características del cable alimentador hasta el punto donde se localiza la fuente de la onda de sobretensión. -La impedancia de onda de las máquinas más pequeñas – de menos de 1000 HP- es mayor que la de las máquinas más grandes y por ello en las máquinas pequeñas, las sobretensiones paradójicamente, son mayores que en los bobinados de las máquinas más grandes.

**3.5.2. -Nivel de sostenimiento frente a las sobretensiones, del aislamiento entre espiras.-** No existe uniformidad de conceptos respecto al nivel de sostenimiento frente a las sobretensiones que deben cumplir los bobinados de los estatores de las máquinas rotativas AC. -El standard NEMA MG1-20.87, provee dos niveles de sostenimiento ante los disturbios de tensión. -Para las sobretensiones de frente empinado, con tiempos de frente de onda de 0,1- 0,2  $\mu$ s, es especificada una capacidad de sostenimiento mínima de 2,0 p.u. para los entornos típicos o normales; refiérase también a [23].

Cuando es requerida una capacidad de sostenimiento mayor, los bobinados deben sostener 3,5 p.u para un tiempo de subida del frente de onda de 0,1– 0,2  $\mu$ s.

Donde las ondas de sobretensión se distribuyan más suavemente a través del bobinado, como las tensiones de rayo, los niveles de sostenimiento son de 4,5 y 5 p.u respectivamente para entornos con sobretensiones normales y altas respectivamente.

La tabla 3.30 siguiente, muestra la comparación de los requerimientos de las recomendaciones y normas IEEE, IEC y NEMA respecto al sostenimiento dieléctrico del aislamiento contra masa y entre espiras, de los bobinados de los

<b>a. -Comparación de los requerimientos de sostenimiento del aislamiento contra masa frente a las sobretensiones de rayo, en p.u.[39]</b>				
<b>Tensión de Línea KV</b>	<b>IEC 34-15 (1995) [28] 1,2/50 <math>\mu</math>s</b>	<b>IEEE 522 Std 1992 1,2 <math>\mu</math>s (<math>\square</math>)</b>	<b>NEMA Normal 1,2 <math>\mu</math>s (<math>\square</math>)</b>	<b>NEMA Opcional 1,2 <math>\mu</math>s (<math>\square</math>)</b>
2,3	7,6	5,0	4,5	5,0
4,0	6,4	5,0	4,5	5,0
6,6	5,8	5,0	4,5	5,0
13,2	5,4	5,0	4,5	5,0
15,0	5,3	5,0	4,5	5,0
<b>b. -Comparación de los requerimientos de sostenimiento del aislamiento entre vueltas, en p.u., frente a las sobretensiones de rápida subida del frente de onda [39]</b>				
<b>Tensión de Línea kV</b>	<b>IEC 34-15 (1995) [28] 0,1-0,5 <math>\mu</math>s (<math>\square</math>)</b>	<b>IEEE 522 Std 1992 0,1-0,2 <math>\mu</math>s (<math>\square</math>)</b>	<b>NEMA Normal 0,1- 0,2 <math>\mu</math>s (<math>\square</math>)</b>	<b>NEMA Opcional 0,1- 0,2 <math>\mu</math>s (<math>\square</math>)</b>
2,3	4,9	3,5	2,0	3,5
4,0	4,2	3,5	2,0	3,5
6,6	3,8	3,5	2,0	3,5
13,2	3,5	3,5	2,0	3,5
15	3,4	3,5	2,0	3,5

(\*) Tiempo de subida del frente de onda

**Tabla 3.25. –Requerimientos del aislamiento entre espiras.**

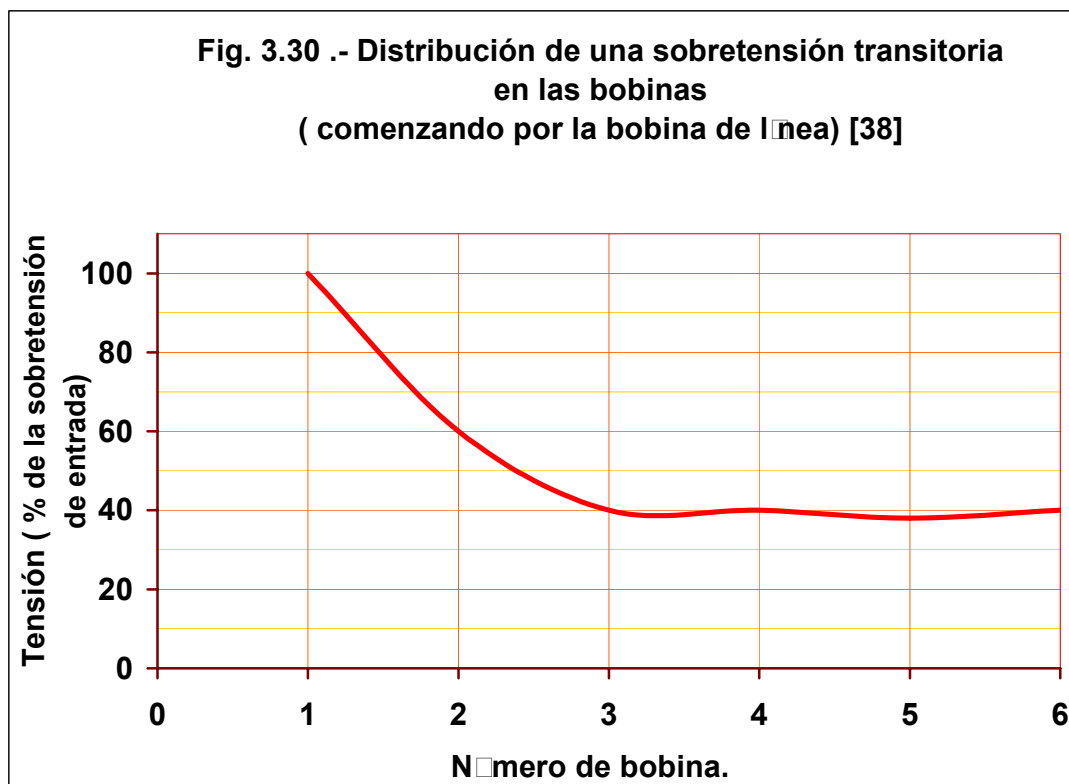
estatores de las máquinas rotativas AC, frente a las sobretensiones de rayo y a las de rápida subida del frente de onda (*fast rise time*).

### **3.5.3. -Distribución de una sobretensión en el arrollamiento de las máquinas de**

**alta tensión A.C.** - Cuando una sobretensión de rayo o una de frente empinado arriba a los terminales de un motor, su propagación a través del bobinado y los esfuerzos dieléctricos que impone al aislamiento entre espiras, son una función del tiempo de subida del frente de onda. - Han sido realizados muchos estudios y

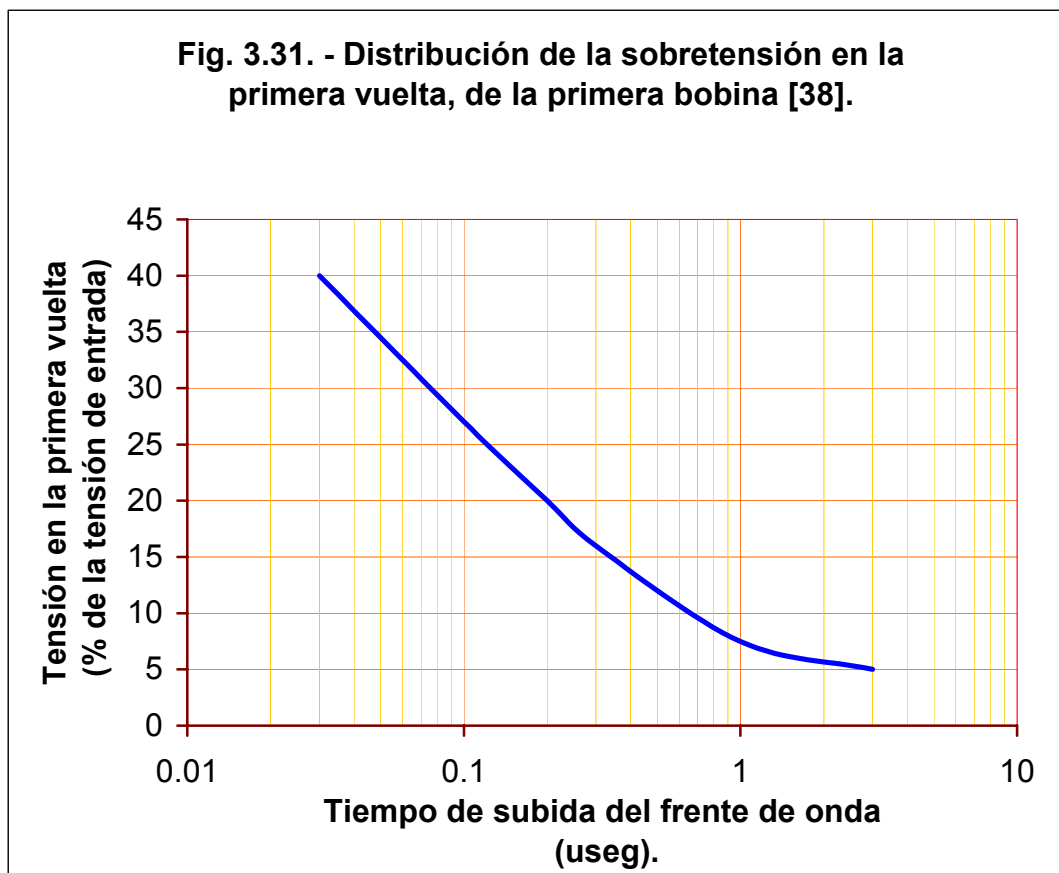
modelos, para desarrollar la distribución de las sobretensiones en el bobinado [35], [38], estos estudios han indicado para las sobretensiones de frente empinado que:

- La distribución de la sobretensión a través del bobinado, no es uniforme y cuando ésta impacta al bobinado, inicialmente, casi todo el voltaje de la sobretensión entera aparece a través de la bobina de entrada (Fig.3.30)
- La distribución de la sobretensión en la bobina de entrada, no es uniforme, especialmente cuando el tiempo de subida es de menos de 0,3  $\mu$ s. (Fig. 3.31)
- La distribución de la sobretensión depende del espesor del aislamiento de pared contra masa y entre espiras de la bobina, y también de la forma, tamaño y largo de las porciones de ranura y de finales de bobina.
- Los factores determinantes de la severidad del esfuerzo dieléctrico entre espiras son el tiempo de la subida del frente de onda y el número de espiras por bobina.
- La sobretensión entre vueltas puede ser tan alta como 130 % del valor promedio entre espiras ( 130% del valor pico de la sobretensión dividido entre el número de espiras de la bobina de entrada), para una sobretensión con un tiempo de subida del frente de onda de 0,1  $\mu$ s y de 125 % del valor promedio para un tiempo de subida de 0,2  $\mu$ s.- estas relaciones son esencialmente independientes de la tensión de la máquina, del diseño del aislamiento y del tamaño de la bobina.
- El espesor del aislamiento, forma y tamaño de la bobina ( su ancho y largo), y de la longitud relativa del núcleo del estator y de los finales de bobina, tienen un efecto menor en la severidad del esfuerzo en el aislamiento entre espiras.



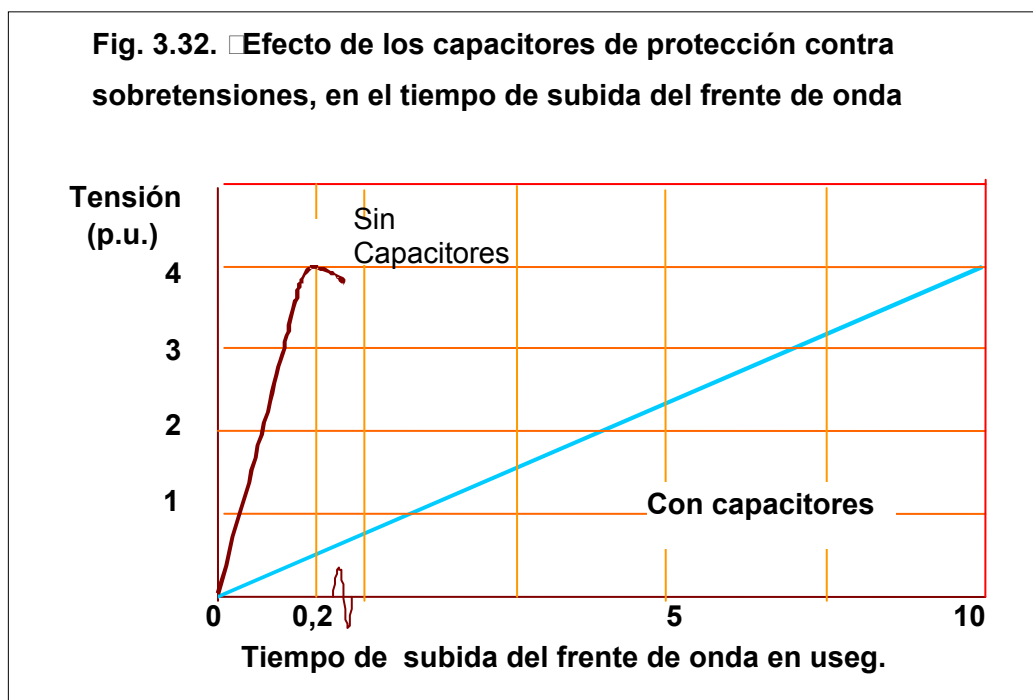
En la ausencia de un comprobado y verificado modelo de computadora, el voltaje de las sobretensiones a través de una vuelta, puede ser aproximado tomando en cuenta la figura 3.30, tomada de un estudio de la EPRI [38] que describe la distribución de la tensión desde la primer bobina conectada a la línea y progresando hasta la sexta bobina de una fase individual alcanzada por una sobretensión de 0,2  $\mu$ s de tiempo de subida del frente de onda y la Figura 3.41, también tomada del mismo estudio, que muestra la distribución de la tensión dentro de la primera bobina y los efectos de los cortos tiempos de subida del frente de onda entre dos vueltas.- A 0,1  $\mu$ s es observada en la primera espira, más del 25 % del total de la sobretensión. -Con tiempos menores de subida del frente de onda, es posible tener mayores tensiones en la primera vuelta. -El espesor del aislamiento entre vueltas se calculará entonces teniendo en cuenta el valor inicial del sostenimiento del dieléctrico que da la curva





de rendimiento tensión Vs. tiempo de aplicación para el tipo de material para el aislamiento del conductor a utilizar, como el de la Fig. 1.4 por ejemplo, y lo indicado en las Figs. 3.30 y 3.31

**3.5.4. –Control del tiempo de subida del frente de onda mediante capacitores de protección.** – Mediante una adecuada aplicación de los condensadores para protección contra las sobretensiones transitorias, en combinación con la impedancia de onda del cable alimentador, es posible incrementar el tiempo de subida del frente de onda con el objeto de que la sobretensión se distribuya mas uniformemente entre espiras en el bobinado.- La Fig. 3.32 [38] muestra la tensión que ingresa a un bobinado Vs. Tiempo de subida del frente de onda, sin y con condensadores de



protección de surge. - Esta figura ilustra el efecto de la inclinación de la pendiente de la subida del frente de onda producido por una mayor constante de tiempo resultado de la compleja combinación de cables, capacitores, conexiones de barras e interruptores. - Se observa que el tiempo de subida del frente de onda ha sido incrementado de 0,2  $\mu$ seg. a 10  $\mu$ seg, mediante la aplicación de los condensadores de protección .

Un aspecto sumamente importante en la aplicación de los capacitores de protección contra sobretensiones es que su efecto favorable se pierde si el cable de conexión entre estos y los terminales de la máquina, incluyendo el cable de puesta a tierra de los capacitores ( los cuales se conectan entre cada línea que llega a la máquina y tierra) excede los 3 pies de longitud.- Adicionalmente, éstos solo aumentan el tiempo de subida del frente de onda, mas no limitan la magnitud de la

sobretensión, la cual debe ser controlada mediante la adición de descargadores de sobretensiones, cuyo propósito es únicamente limitar el valor pico de la magnitud de la sobretensión, mas no la tasa de subida del frente de onda.- El uso de los descargadores es necesario cuando la máquina esta conectada a líneas aéreas expuestas al impacto de sobretensiones, pero necesariamente deben ir junto con los condensadores de protección.

Los condensadores para protección contra sobretensiones industrialmente se usan de acuerdo a la tensión de suministro

<b>Tipo NEMA</b>	<b>Descripción</b>	<b>Espesor del aislamiento Mils (mm)</b>	<b>Capacidad de surge. (kV)</b>
<b>MW 36C</b>	Esmalte Poly-film	5 (0,13)	8
<b>MW 46C</b>	Esmalte Poly-film / vidrio.	13 (0,33)	12
	Cinta de mica de alta rigidez.	26 (0,66)	35

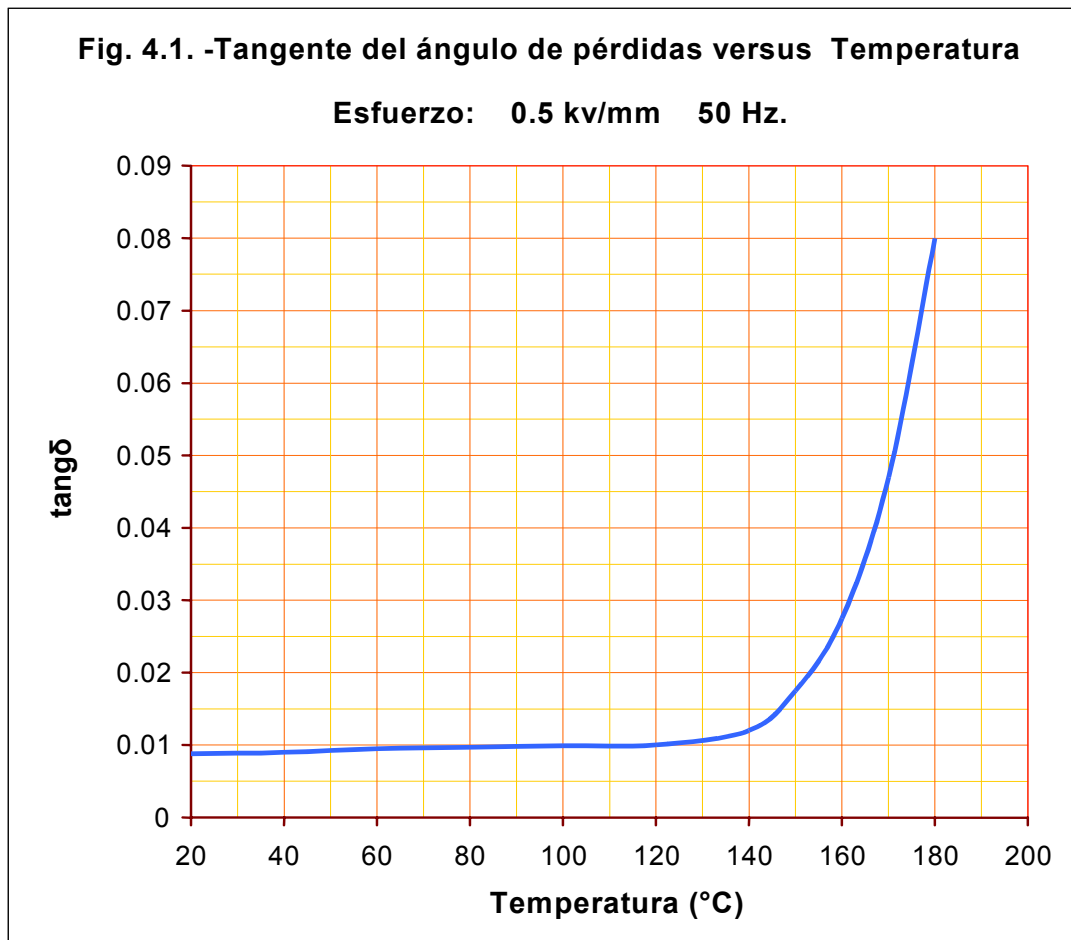
**Tabla 3.31. – Capacidad de sostenimiento frente a las sobretensiones, de los aislamientos comerciales para alambre de cobre para bobinas preformadas [38]**

## CAPÍTULO IV

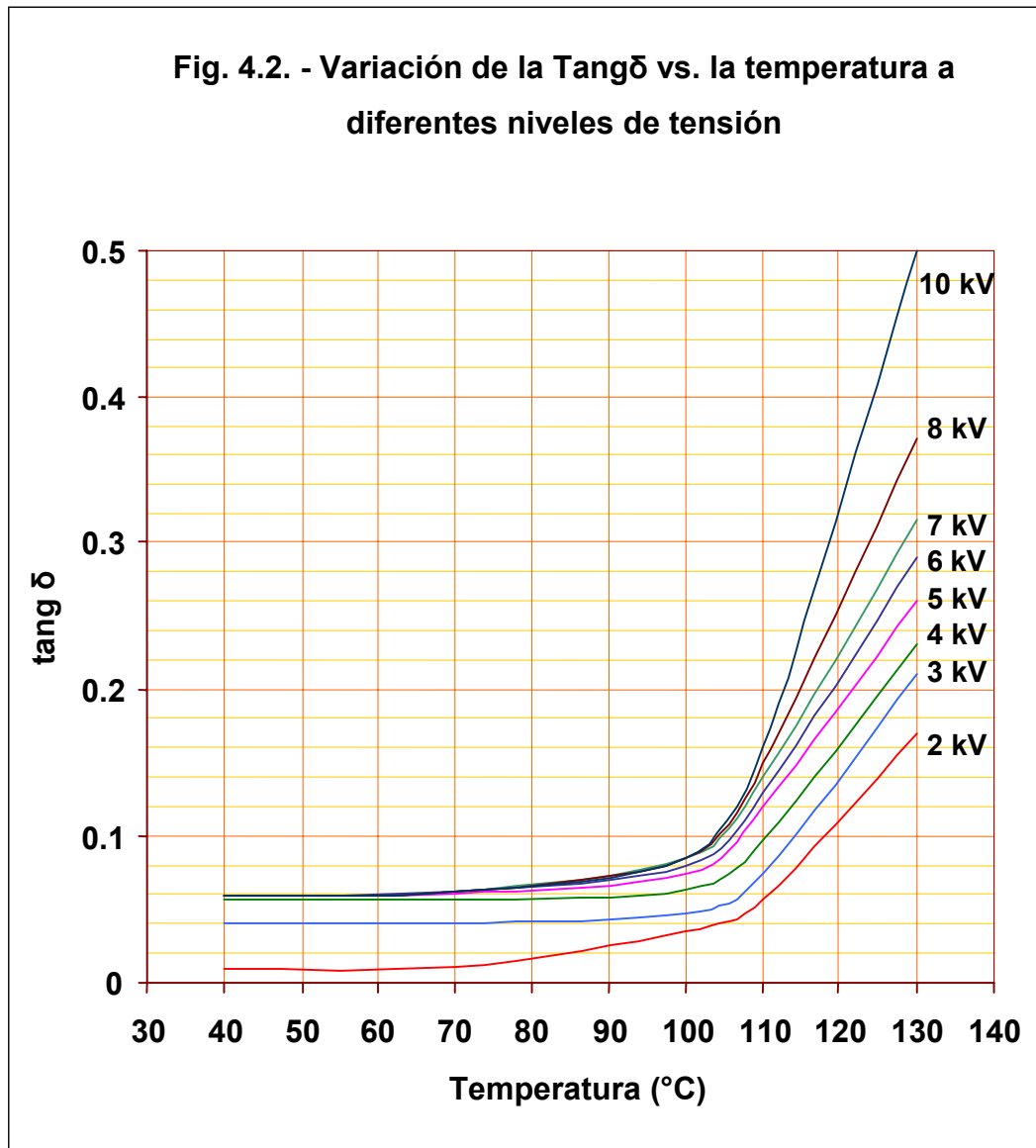
### **INFLUENCIA DE LA TEMPERATURA EN LOS EFECTOS DEL CAMPO ELÉCTRICO DE ALTA INTENSIDAD EN LOS BORDES DE LAS BOBINAS DE ALTA TENSIÓN, CON AISLAMIENTOS A BASE DE MICA-EPOXY**

**4.1. -Introducción.** - Desde el comienzo del desarrollo de las resinas como agente aglutinante de los aislamientos de mica para las bobinas de alto voltaje, se observó que la característica de la  $\tan\delta$  en función de la temperatura era como se muestra en la Fig. No. 4.1, [33]. -Como podía apreciarse, en la Fig. 4.1, el factor de pérdidas o  $\tan\delta$ , tiene un valor casi constante desde la temperatura ambiente hasta los 100 a los 120 °C, mas allá de la cual, aún con un esfuerzo de campo eléctrico de baja magnitud, se producía un brusco incremento en las pérdidas dieléctricas, estando dentro del rango de la clase térmica considerada, de clase F (155°C - Ver la tabla 1.6) con un límite -para este material- de 180 °C según el fabricante de ese entonces.

Estas características no han mejorado, [37], lo cual puede obedecer a que han sido mejoradas otras características como el coeficiente de dilatación del aislamiento para permitir las expansiones del cobre por efectos térmicos. -Esta característica depende de varios factores pero principalmente, del material de soporte – tejido de vidrio, film o fieltro de poliéster- del tamaño y tipo de las laminillas de mica, pero sobre todo,

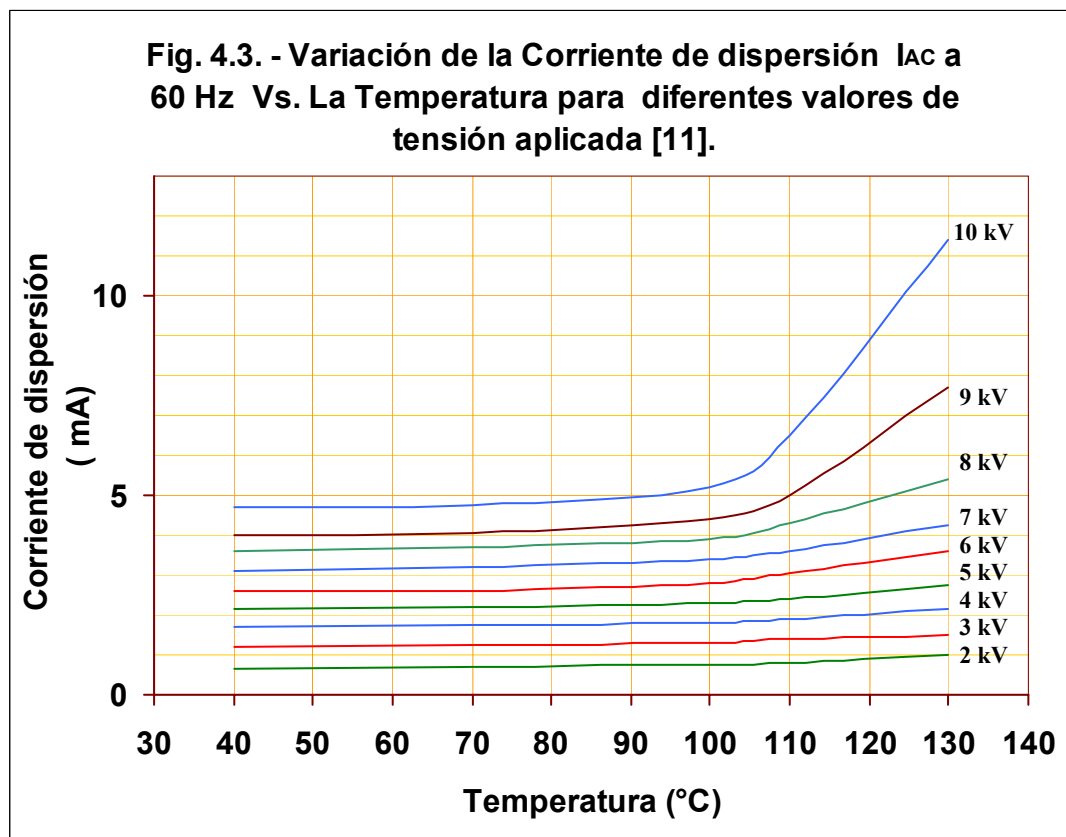


del tipo de resina o material aglutinante de la mica. - La característica de la  $\tan \delta$  debería ser como la de la Fig. 4.1 pero el codo de dicha curva, a la temperatura umbral, debería situarse mas allá de la temperatura que caracteriza la clase térmica del sistema aislante, y no ser afectada ostensiblemente por el nivel del esfuerzo dieléctrico, en operación normal o por la presencia de sobretensiones.- Esta característica va acompañada además de una característica adicional que es importante observar en las hojas técnicas de un material aislante, siendo ésta, la característica de la  $\tan \delta$  vs. la tensión aplicada en función de la temperatura (o en función de la temperatura para diferentes niveles de tensión aplicada) como el que se muestra en la Fig. 4.2 [36]. -En la actualidad, se realizan múltiples estudios en



vistas a evaluar y predecir mediante modelos, la vida de un sistema de aislamiento, sujeto a los esfuerzos combinados, térmicos y dieléctricos, y se ha encontrado, que más allá de esa temperatura umbral situada entre los 100 y 120 °C, ocurren efectos deletéreos en la estructura del aislamiento [11], [13]

En el reporte de S. Rengarajan [11], se presentaron los resultados de un estudio experimental realizado utilizando muestras de barras de la parte activa de bobinas de



máquinas AC, de aproximadamente un metro de largo, con aislamiento de mica-vidrio-epoxy, del sistema Resin-Rich de 0,75 mm de espesor para bobinas de alta tensión, fabricadas empleando técnicas de manufactura estándar. - En este reporte no se ha especificado el radio de los bordes del paquete de conductores de las barras (Cap.III), es decir, no se indica con que esfuerzo máximo en los bordes han sido realizadas las pruebas, y el aislamiento es realmente reducido por lo que se infiere, con ello han tratado de evitar el efecto de bordes, con lo que ya no serian muestras de bobinas estándar, en todo caso, la contribución de los bordes en las características medidas, están mimetizadas en los valores promedio reportados.

En la Fig. 4.2 se ha copiado aquí para ilustración, las características de la  $\tan \delta$  y de la corriente de dispersión vs. la temperatura del aislamiento de las barras

utilizadas en dicho reporte [11] - Si bien estas características reportadas, pueden dar una tendencia global de lo que ocurre en un aislamiento como en el de las barras (parte recta) de las bobinas de alta tensión, tal como se ha mostrado en los dos capítulos anteriores de este trabajo, las corrientes en los bordes de las bobinas de AT (por las proporciones de la forma de la sección de las barras en la parte recta), son comparativamente más pequeñas respecto a la corriente en las partes laterales de las barras, y ambas componentes de corriente, corresponden a niveles de esfuerzos dieléctricos diferentes; Por lo tanto si pudiera separarse la componente de corriente de los bordes y verse en función del esfuerzo dieléctrico en dicha zona del aislamiento de las bobinas, se observaría estos fenómenos en forma más específica. - Para el caso los autores del reporte citado han utilizado el equipamiento del Laboratorio de Alta tensión del Instituto de Ciencia de Bangalore, de la India (éstas facilidades en nuestro medio parcialmente en forma privada ya existen, pero su acceso a nivel de investigación o de servicios, es muy costoso). -En conclusión, lo que se indica en dicho reporte es que la variación de la capacitancia, de la tangente del ángulo de pérdidas dieléctricas, de la magnitud de las descargas promedio y de la corriente a través del aislamiento, tienen un comportamiento similar entre ellas, con las siguientes características:

- Para una determinada temperatura  $T$  en el dominio de los  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$  a los  $180\text{ }^{\circ}\text{C}$ , los parámetros indicados, se incrementan en magnitud con el incremento de la tensión aplicada.
- Los cambios en todos estos parámetros son moderados hasta cierta temperatura alrededor de los  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ , mas allá de esa temperatura, llamada temperatura umbral, los cambios en dichos parámetros son muy grandes.



**4.2. - Evaluación experimental, resultados, interpretación.** - Con el objeto de evaluar la característica de la corriente de dispersión Vs la temperatura en función de la tensión aplicada como parámetro, en los aislamientos de mica-epoxy que se usan en las bobinas de A.T. como el que sugiere la Fig. 4.3 tomada de [11], teniendo en cuenta lo desarrollado en los Capítulos II y III, y refiriéndonos a las Figs. 2.3 a 2.5 observamos que interesa averiguar en forma separada el comportamiento del dieléctrico en función de la temperatura, cuando está sometido a los esfuerzos del campo eléctrico de diferentes intensidades como los que se presentan en las partes laterales y en las zonas de los bordes de las bobinas. - Es necesario entonces conseguir un modelo físicamente realizable para simular el comportamiento de las partes laterales o planas y otro modelo para simular el comportamiento de los bordes.

Para el caso, la parte correspondiente a las zonas laterales de la parte activa de las bobinas, que es una configuración capacitiva de electrodos planos la podemos modelar en forma aproximada utilizando una disposición de conductores cilíndricos coaxiales con el radio interior y el radio exterior lo suficientemente grandes y aproximadamente iguales ( $r_2 \approx r_1$ ), de tal forma, que la relación entre los esfuerzos de campo eléctrico máximo y promedio  $E_{max}/E_{med}$ , sea cercana a la unidad ( $E_{med} = V/d$ ), con lo que se simularía el comportamiento de una configuración capacitiva de electrodos planos.

Como se ha indicado en los capítulos anteriores, el comportamiento de los cuatro bordes, lo podemos observar en forma global si simulamos su comportamiento usando un modelo de línea de conductores cilíndricos coaxiales, con los mismos radios interior y exterior de los bordes y usando como dieléctrico el mismo material

de mica epoxy que se utiliza en la fabricación de las bobinas. -En las figuras 4.9 a 4.11 se ilustra el resultado obtenido utilizando tres muestras con forma de línea de conductores cilíndricos coaxiales, utilizando los mismos materiales de las bobinas de A.T. con las siguientes características físicas.

**a. - Muestra No.1.**- Para simular el comportamiento de las partes laterales de las bobinas:

Diámetro del conductor interior ( $d_1$ ) : 16 mm

Diámetro del conductor exterior ( $d_2$ ) : 18 mm

Espesor del aislamiento o dieléctrico ( $d$ ): 1,0 mm

Características del aislante: Ver la Tabla No 1.3

longitud del conductor exterior : 150 mm

Relación  $E_{max}/E_{unif}$ = 1.06

Resultado: Tabla 4.1 y Fig. 4.4.

**b. -Muestra No.2.** - Para simular el comportamiento de los bordes de las bobinas.

Diámetro del conductor interior ( $d_1$ ) : 2,2 mm

Diámetro del conductor exterior ( $d_2$ ) : 8,0 mm

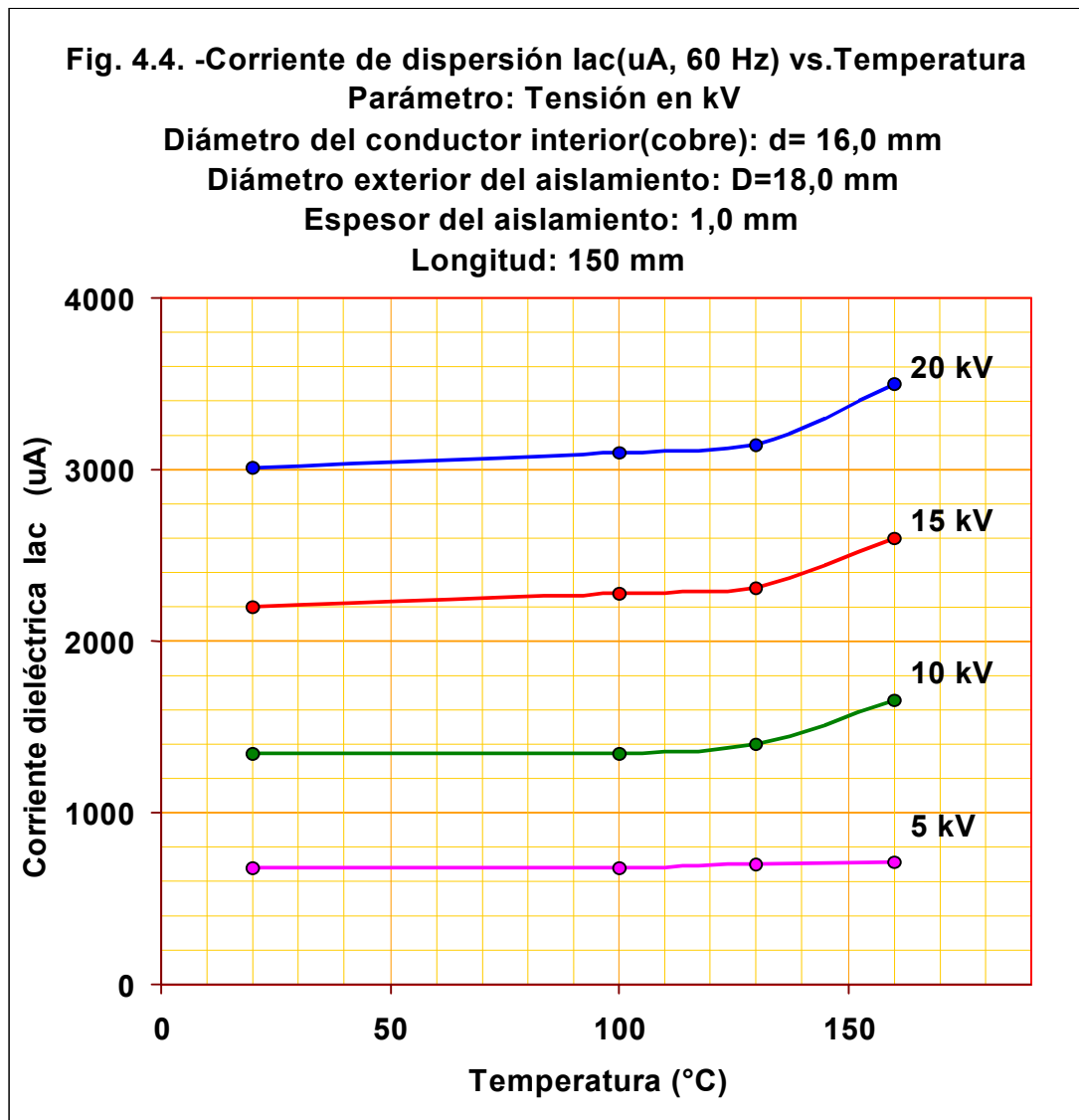
Espesor del aislamiento ( $d$ ) : 2,9 mm

Características del aislamiento: Ver la Tabla No 1.3

longitud del conductor exterior : 150 mm

Relación  $E_{max}/E_{unif}$ = 2,04

Resultado: Tabla 4.2 y Fig . 4.5



Tensión kV	Emedio kV/mm	E <sub>max</sub> kV/mm	I <sub>ac</sub> (uA) a 20 °C (□)	Corriente de dispersión I <sub>ac</sub> (uA)			
				Temperatura			
				20 °C	100 °C	130 °C	160 °C
5	5.00	5.31	667	680	683	698	710
10	10.00	10.61	1334	1340	1350	1400	1660
15	15.00	15.92	2002	2200	2280	2310	2600
20	20.00	21.22	2670	3010	3100	3150	3500

\* Valor teórico calculado con una permitividad relativa de  $\approx 5$

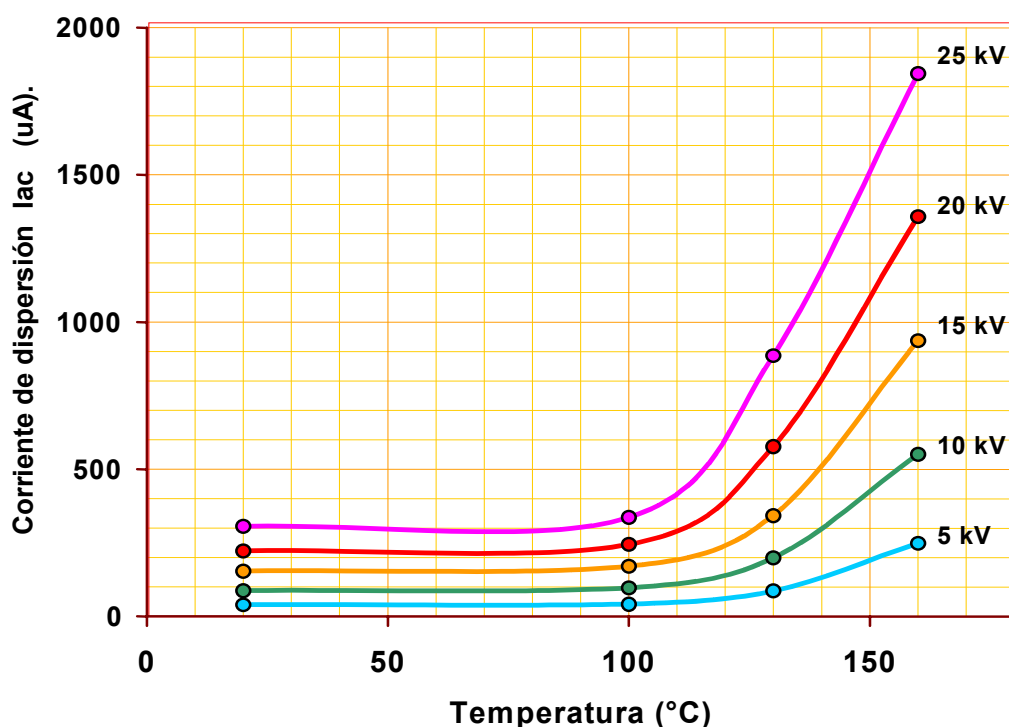
**Tabla 4.1. -Datos experimentales de la Fig. 4.4**

Fig. 4.5. - Corriente de dispersión  $I_{ac}$ , 60 Hz Vs Temperatura.

Parámetro: Tensión en kV

Diámetro del conductor interior( $d_1$ ):  $d= 2.2$  mmDiámetro del conductor exterior(  $d_2$ ):  $D=8.0$  mmEspesor del aislamiento (  $d$ ): 2.7 mm

Longitud : 150 mm



Tensión kV	$E_{medio}$ kV/mm	$E_{max}$ kV/mm	$I_{ac}$ ( $\mu A$ ) a 20 $^{\circ}C$	Corriente de dispersión $I_{ac}$ ( $\mu A$ )			
				Temperatura			
				20 $^{\circ}C$	100 $^{\circ}C$	130 $^{\circ}C$	160 $^{\circ}C$
5	1.72	3.52	60.89	40	42	87	249
10	3.45	7.04	121.79	88	97	199	551
15	5.17	10.56	182.68	154	170	343	937
20	6.90	14.08	243.58	222	245	577	1358
25	8.62	17.60	304.47	306	337	886	1844
31	10.69	21.83					3720
39	13.45	27.46					falla
$(\square)$ Capacidad a 20 $^{\circ}C$			0.0323 nF				

Valor teórico calculado con una permitividad relativa de  $\approx 5$ 

Tabla 4.2. -Datos experimentales de la Fig. 4.5

Las muestras en forma de línea coaxial y el circuito utilizado para obtener las características de la corriente de dispersión vs. la temperatura, para diferentes niveles de la tensión aplicada son similares a lo mostrado en la Fig. 3.28 del Cap.III.- A dicho circuito se le ha añadido un sistema para el calentamiento controlado del aceite dieléctrico. -En las Fig. 4.4 y 4.5, observamos que la temperatura umbral se presenta alrededor de los 100 a 120 °C y el comportamiento no lineal de la corriente depende del nivel del campo eléctrico aplicado.

La Fig. 4.4, correspondiente a la muestra No.1, ilustra el comportamiento de la corriente de dispersión en función de la temperatura, cuando el dieléctrico es sometido a diferentes niveles de campo eléctrico de distribución casi uniforme, es decir, cuando  $E_{MAX}/E_{unif.} \approx 1,0$ . - En la muestra No.1 dicha relación es de 1,06 y vemos, que al aplicar una tensión de 20 kV ( $E_{unif}=V/d= 20$  kV/mm y  $E_{max} = 21,2$  kV/mm), la corriente de dispersión a 160 °C es 1,16 veces la corriente a 20 °C.

En la muestra No.2 la relación  $E_{MAX}/E_{unif.}$  Es igual a 2,04. - En la figura 4.5 podemos observar que para la tensión de 20 kV ( $E_{unif}=V/d= 6,9$  kV/mm y  $E_{max} =14,08$  kV/mm), la corriente de dispersión a 160 °C es del orden del 610 % de la corriente a 20 °C.

Al observar las características de la corriente dieléctrica en los casos mostrados, se concluye que este comportamiento se ve fuertemente afectado dependiendo del nivel del campo eléctrico aplicado.

Volviendo a la intención de lo efectuado, se concluye que en las bobinas de las máquinas rotativas de AT de corriente alterna, en las partes laterales de la parte activa, donde el nivel del campo eléctrico es casi uniforme y en condiciones de

prueba a frecuencia industrial se alcanzan niveles de 7.5 kV/mm en la prueba de tensión aplicada contra masa y a 15 kV/mm en la prueba equivalente a la de impulso a 60 Hz [28], el efecto de la temperatura no es apreciable. -Sin embargo, en los bordes de las bobinas, donde según el diseño y de lo que permita el espesor de la sección del conductor en los bordes del paquete de conductores, el campo eléctrico puede tomar valores de 15 y de 30 kv/mm según lo indicado en la Fig. 3.25 del Cap. III. -En dichas circunstancias, debido a los efectos de la temperatura, los materiales epóxicos que se usan actualmente como elemento aglutinante de la mica, responden de manera desfavorable como se muestra en las Figs. 4.4 y 4.5.

La Figura 4.6 muestra el mapa de campo eléctrico en el aislamiento correspondiente a la zona del borde de las bobinas de AT; ha sido confeccionada tomando como base la Fig. 3.9. -En dicha figura se ha resaltado el tubo de flujo de campo eléctrico que está ubicado en la parte central del borde.- El objeto de esta figura es observar cual es la relación de la densidad volumétrica promedio de la energía en una celda del dieléctrico ubicada sobre el borde del cobre, respecto de las celdas en las partes laterales.

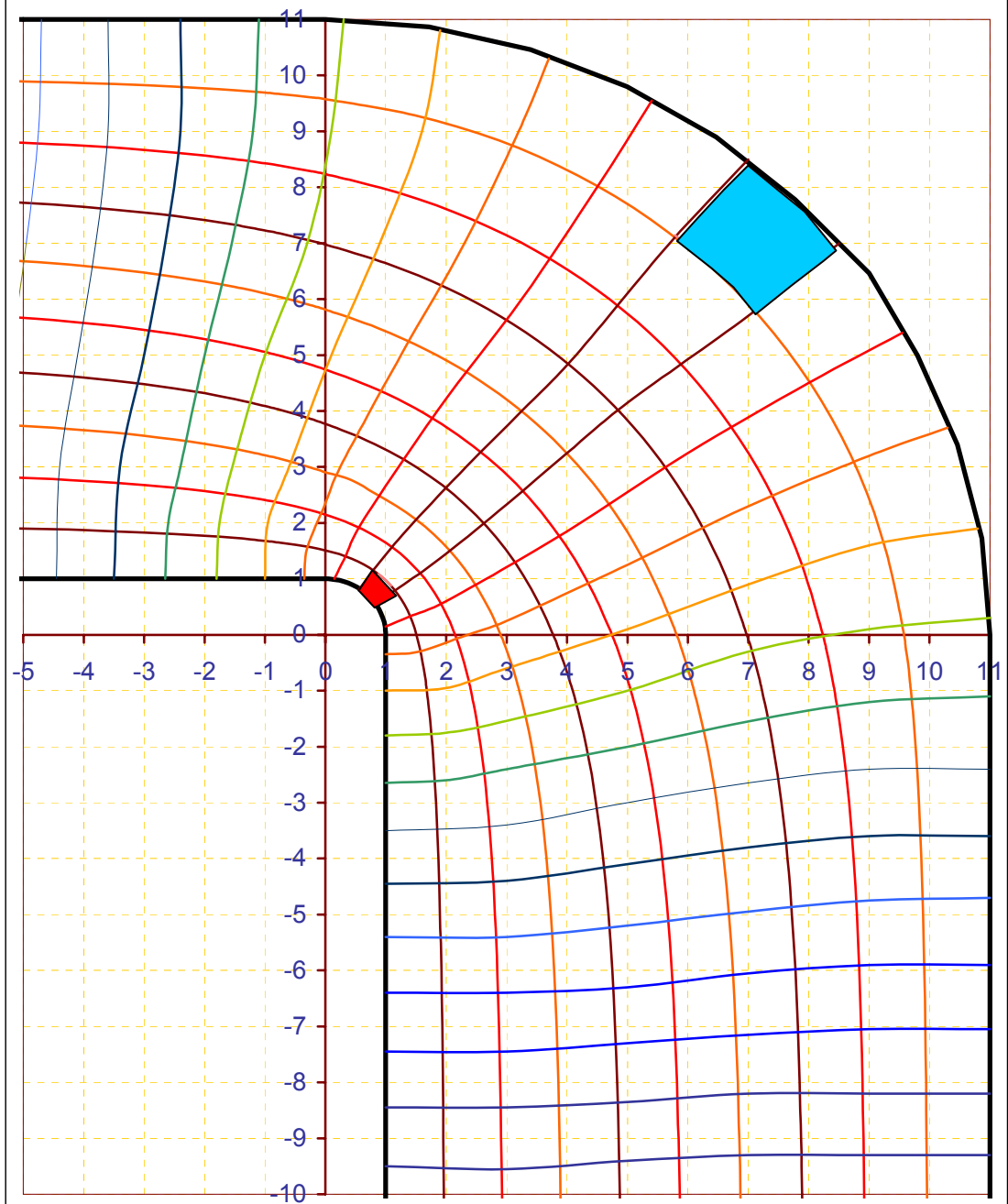
Como se conoce, y se ha mencionado en el Acápite 1.12, la densidad media de la energía almacenada en una celda correspondiente a un mapa de campo eléctrico cualquiera, es inversamente proporcional al área de los extremos de la celda (a la sección de los cuadrados curvilíneos que se muestran en el mapa de campo) y es proporcional al cuadrado del campo eléctrico promedio en la celda ( $W = \frac{1}{2} \cdot \epsilon \cdot E^2$ )

En la Fig. 4.6 se muestra el mapa de campo eléctrico del borde de una bobina cuyo radio de bordes es del 10 % del espesor del aislamiento, en este mapa se observa que

la celda de campo -del tubo de flujo de campo eléctrico resaltado- que está junto al borde del conductor interior tiene una sección ( el área que se muestra en el dibujo) de aproximadamente 16 veces menor que la celda del mismo tubo de flujo, que está al otro extremo, junto al borde exterior del aislamiento; por lo tanto, la densidad de energía en la celda interior, es 16 veces mayor que en esa celda que está junto al conductor exterior y respecto a las celdas promedio ubicadas en la parte lateral del aislamiento, es 6 veces mayor.

Es obvio pues, que una configuración desventajosa de los electrodos, con radios de bordes pequeños a semejanza de filos agudos, empeora el mal comportamiento de las resinas sintéticas utilizadas como aglomerante en los aislamientos micáceos para bobinas de alta tensión, en especial de las epóxicas en función de la acción combinada de la temperatura y el nivel de campo eléctrico aplicado.

**Fig. 4.6.- Mapa de campo eléctrico y de equipotenciales en el aislamiento del borde de una bobina de AT.-  
Radio del borde: 10% del espesor del aislamiento.**



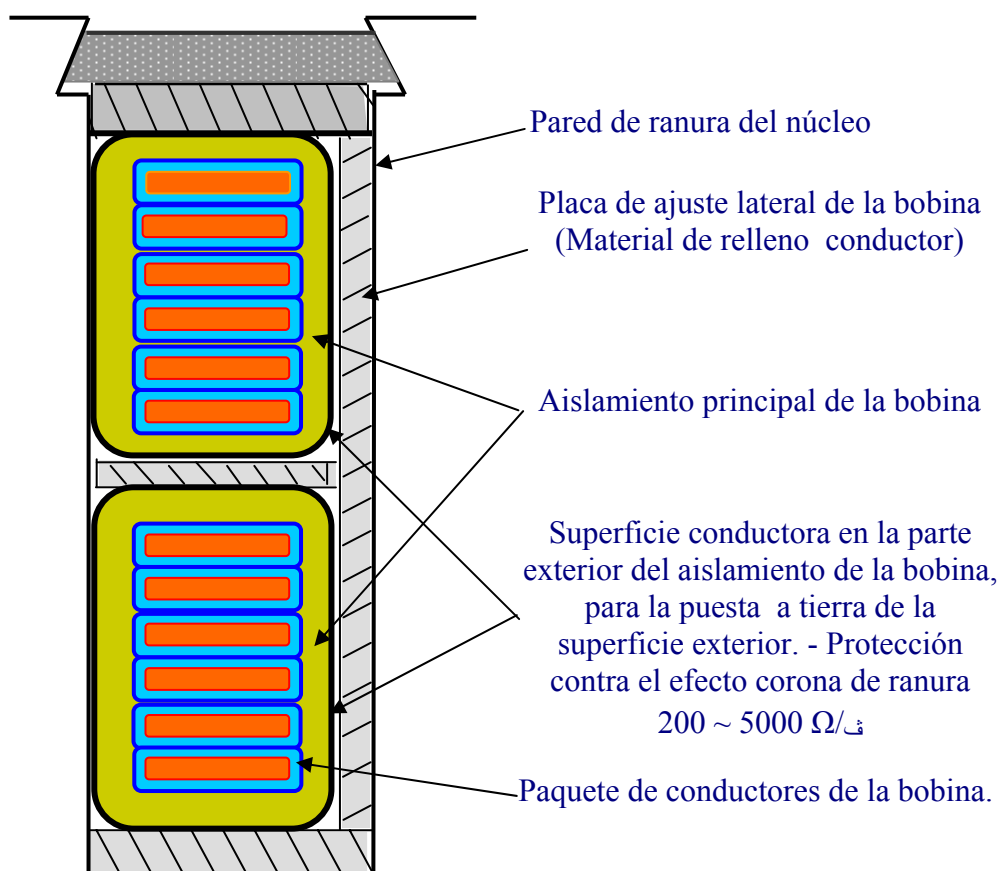


## CAPÍTULO V

### CONTROL DE LOS GRADIENTES DE POTENCIAL SUPERFICIALES

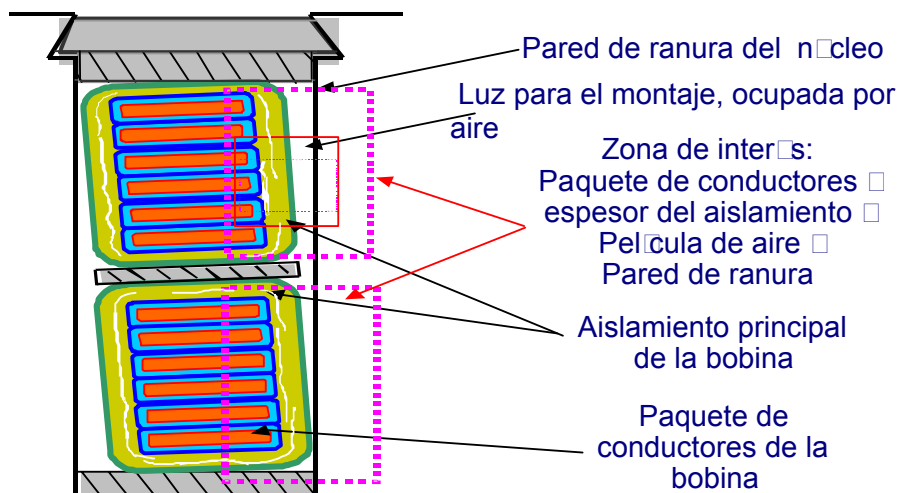
**5.1. - Introducción.** - Si nos referimos a la Fig. 5.1 en la zona de la ranura del estator, las bobinas son montadas con cierta holgura ( $1/40''$  en el sistema de bobinas rígidas) con el objeto de no dañar el aislamiento y de no causar daños mecánicos a la protección contra el efecto corona instalada en la superficie de la bobina.- Cuando la bobina ha sido instalada en su lugar en las ranuras, se inserta en uno de los lados un material de naturaleza conductora, con el objeto de dar el ajuste adecuado y el contacto contra masa, de la bobina contra las paredes de la ranura y a la vez proveer un camino a masa, del calor producido por las pérdidas. – En la Fig. 5.1, se ha exagerado el espesor del material conductor de relleno lateral.

Supongamos que no existiera el material conductor de relleno, y la bobina se monte con una luz de 0,1 a 0,3 mm y no se aplique ningún material conductor para la puesta a masa de la superficie exterior de la zona de ranura de la bobina; o que el recubrimiento conductor se haya dañado en algún punto; entonces en el espacio entre el paquete de conductores de cobre de la bobina y la pared de ranura, quedarían distribuidos: el aislamiento y un espacio de aire, además de que por otras causas, se haya producido la formación de películas vacías entre el cobre y el aislamiento, y en el aislamiento mismo, como exageradamente se muestra en la Fig. 5.2, en la cual si tomamos el pequeño sector marcado con líneas de puntos y lo



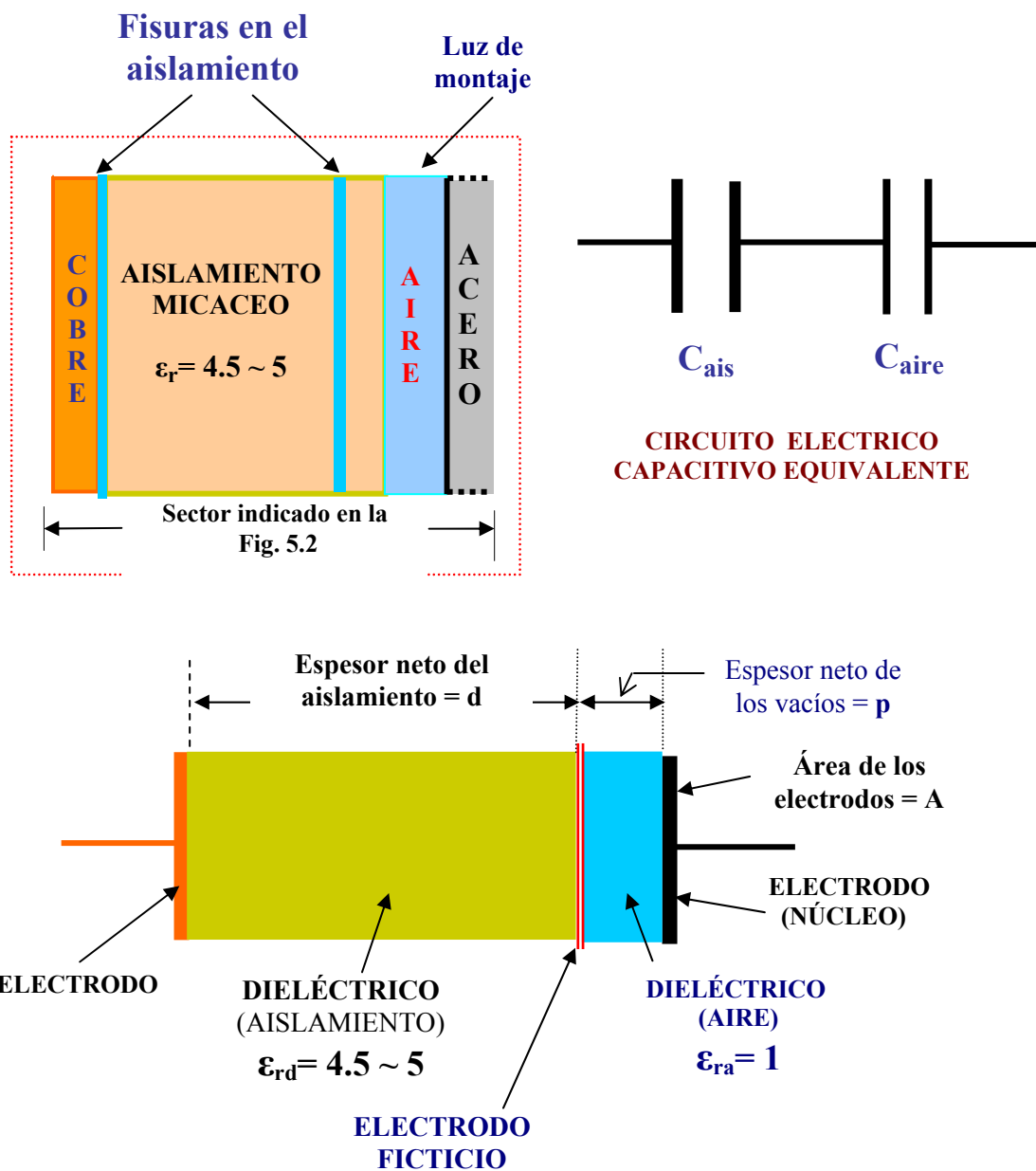
**Fig. 5.1. – Esquema en corte, de la disposición de los lados de bobina en la zona de las ranuras.**

vemos en la Fig. 5.3, observamos que puede interpretarse como a una configuración capacitiva con dieléctricos diferentes en serie y cuyo esquema eléctrico se puede expresar como se indica en dicha figura. - Si entonces se aplica una determinada tensión de V voltios, entre el paquete de conductores de cobre de la bobina y el núcleo magnético, la tensión se distribuirá en el espesor del aislamiento de la bobina y en las películas de aire de acuerdo a la ecuación 1.8, repartiéndose en función inversa a sus permitividades relativas y directamente respecto a su espesor. -El esfuerzo de rotura del aislamiento es típicamente del orden de los 35 kV/mm o más, es decir que en las partes laterales, se tendría una tensión de rotura muy alta, de 35 kV o más, sin embargo la tensión de rotura de las película de aire o de los huecos,



**Fig. 5.2. - Disposición de los lados de bobina, con defectos físicos y de montaje**

están gobernadas aproximadamente por la característica de Paschen para el aire ( Ver la Fig 1.1 y 1.2). - La tensión de perforación del aire, depende del producto de la distancia entre los electrodos multiplicada por la presión del aire ( o del gas) teniendo un valor mínimo de 350 voltios d.c o AC pico, a una atmósfera de presión, cuando la distancia es de aproximadamente 0,01 mm, ( $3 \times 10^{-4}$ ). - Al aplicar una tensión alterna entre la bobina y tierra, durante las alternancias positiva y negativa, cada vez que la fracción de la tensión aplicada correspondiente a la película de aire, supere el valor de inicio de la descarga de acuerdo a la característica de paschen, se producirá la rotura de la rigidez del aire como dieléctrico, conduciendo en forma de descargas la corriente de polarización del dieléctrico principal, o sea, del aislamiento. Estas descargas dependiendo de la localización de las películas de aire o de los defectos en el aislamiento tienen una determinada forma teniendo una mayor intensidad cuando el aislamiento hace el papel de cátodo. [40] , [42] y[54]



**Fig. 5.3. – Configuración resultante del sistema de aislamiento de la bobina en el sector indicado de la Fig. 5.2.**

**5.2. –Descarga parcial.** – La DP, puede ser descrita como un pulso eléctrico o descarga en un hueco lleno de gas, o en la superficie de un dieléctrico sólido o líquido, de un sistema de aislamiento, estando su característica Tensión de descarga vs. Espesor del hueco, gobernada por la característica de Paschen para distancias

cortas.- Este pulso o descarga, pone en cortocircuito solo parcialmente el espacio entre el aislamiento de fase a tierra o entre fases. - En el sistema de aislamiento de las máquinas rotativas, estas descargas pueden ocurrir en cualquier hueco ubicado entre el conductor de cobre de las bobinas y el núcleo o el frame puestos a la tierra de referencia. -Los huecos pueden ser localizados: a. -Entre el conductor de cobre y la pared del aislamiento contra masa, b. - Internamente en el aislamiento mismo y c. - Entre la pared exterior del aislamiento y el núcleo o frame puesto a tierra, o a lo largo de la superficie del aislamiento de los finales de bobina .

Las descargas son pequeños arcos que ocurren dentro del sistema de aislamiento y pueden ocurrir también frecuentemente en su superficie, por ello lo deterioran y pueden resultar en su falla.

**5.3. - Protección contra el efecto corona en la zona de ranura.** - Con el objeto de evitar que el paso de la corriente de polarización del dieléctrico, entre el aislamiento de las bobinas en la zona de ranura y las paredes de ranura, se realice con producción de descargas parciales en todos aquellos puntos en los cuales existan películas de aire remanentes del juego de montaje, se hizo necesario desde un inicio del desarrollo de la técnica de la A.T, aplicar, a la superficie exterior de la parte activa de las bobinas de una película conductora de cierta resistencia, para derivar por ella hacia masa, a la corriente de dispersión, desde aquellos puntos en los cuales no hay contacto franco contra masa, hasta aquellos puntos donde la superficie de la bobina esté firmemente ajustada contra las paredes de la ranura. - Esta resistencia trabaja a manera de resistencia en derivación o shunt, puentando las películas de aire que hayan quedado

como resultado de las imperfecciones del acuíado del montaje sobre todo en las zonas curvadas y caprichosas de la superficie exterior de las bobinas, donde no es posible de que éstas últimas puedan quedar en contacto con los recodos de la superficie interior de las ranuras.

Dos preguntas se plantean de inmediato: qué valor de resistencia superficial debe tener esta superficie conductora y a partir de qué nivel de tensión de trabajo de las máquinas de AT debe aplicarse. - La resistencia de ésta superficie conductora, no debe ser de un valor bajo del orden de los ohmios o decenas de ohmios, ya que produciría un efecto de carga apreciable en el nivel de las corrientes de foucault, las que se evitan mediante el laminado y aislado de las chapas del núcleo magnético.- El otro límite está dado por la tensión de descarga de las películas de aire o de gas dada por la característica de paschen; por lo que la caída de tensión que en algún sector de esta superficie produzca el paso de la fracción correspondiente de la corriente de dispersión, bajo condiciones de tensión de prueba (de unos 100 o 200 mA/m<sup>2</sup>) deberá ser menor que la tensión de ruptura mínima ( 350 voltios) de las películas de aire. - Industrialmente, se usan pinturas o cintas, los cuales, luego de aplicados a la superficie exterior en la parte activa de las bobinas, deben ostentar una resistencia del orden de los 2000 o 5000  $\Omega/\square$  ( ohmios por cuadrado de superficie) [17].

El control de la igualación del potencial en la superficie de las bobinas en la zona de ranura se aplica actualmente en las bobinas de las máquinas de más de 4.160 voltios, ya que el efecto corona se hace tangible cuando el valor eficaz de la corriente alterna aplicada entre bobinas y masa está entre los 3.500 y los 4.000 voltios.

<b>Tipo de aislamiento</b>	<b>Tensión nominal</b>	<b>Tensión de fase (línea vs. masa) valor pico.</b>	<b>Tensión de prueba (2Un+1) Valor pico.</b>	<b>Aislamiento de bobina (espesor)</b>	<b>Juego de montaje</b>	<b>Sumatoria posible de las películas de aire en el aislamiento.</b>
	<b>kV</b>	<b>kV</b>	<b>kV</b>	<b>mm</b>	<b>mm</b>	<b>mm</b>
<b>Flexible / VPI</b>	2,3	1,9	7,9	1,2	0,2	0,54 ----
<b>Flexible / VPI</b>	4,16	3,4	13,18	1,65	0,2	0,54 ----
<b>Flexibles / Rígidas</b>	5,0	4,1	15,55	1,9 1,5	0,2 0,5	0,54 0,0
<b>Rígidas / Flexibles</b>	6,6	5,4	20,08	1,8 1,9~2,15	0,5 0,2	0,0 0,2
<b>Rígidas ( VPI / Prensadas)</b>	10,0	8,2	29,7	3,0	0,5	---- 0,0
<b>Rígidas ( VPI / Prensadas)</b>	13,8	11,3	40,44	4,0	0,6	---- 0,0

**Tabla 5.1. –Espesor posible de las películas de aire entre el cobre y el núcleo, en la zona de ranura.**

Para las máquinas de 2.300 y 4.160 voltios la tensión de operación máxima contra masa de las primeras bobinas (Tensión de línea vs. masa) es de 1.328 y 2.400 voltios eficaces respectivamente.- Si tomamos como ejemplo la tabla No.5.1 y las Figs 1.1 y 5.3 para el cálculo del reparto de tensiones correspondientes a las películas de aire y al espesor del aislamiento, bajo condiciones normales de trabajo (con la tensión de línea Vs. masa, no con la tensión de prueba) en función del espesor posible de las películas de aire, y aplicando la Ec. 1.8 que reproducimos aquí, bajo la forma:

$$V_i = \frac{d_{airei} * V}{\left(\sum d_{airej}\right) + \frac{d_{ais}}{\epsilon_{rais}}} \quad \text{Ec. 5.1}$$

Donde :

$V_i$  = Tensión en la película de aire “i”

$d_{airei}$  = espesor de la película de aire “i”

$V$  = Valor pico de la tensión aplicada entre bobina y tierra.

$\sum d_{airej}$  = Sumatoria o valor neto de los espesores de las películas de aire, en una zona particular del aislamiento de la parte activa.

$d_{ais}$  = Espesor neto del aislamiento de la bobina

$\epsilon_{rais}$  = Permitividad relativa del aislamiento ( $\approx 4,5$ )

$\epsilon_{rairei}$  = 1 ( se ha omitido indicarlo en la formula por ser su valor igual a 1,0)

y teniendo en cuenta que el factor de corrección  $\delta$  para la tensión de descarga del aire a una temperatura y presión diferentes de 20°C y 760 mmHg. es [4]

$$\delta = \frac{P_1 \cdot (273 + 20)}{760 \cdot (273 + t_1)}$$

con lo que la tensión de perforación a la nueva presión y

temperatura es de  $U_p^1 = U_p \cdot \delta$ . - Entonces, graficando estas distribuciones de tensión contra la característica de la descarga del aire a 20 °C y a 120 °C, lo cual se muestra en la Fig. 5.13, podemos observar la razón por la cual en los niveles de tensión mencionados ( hasta 4.200 voltios) no se considera necesario el uso de la igualación de potencial en la zona de ranura (en estos dos niveles de tensión, la gran mayoría de las bobinas son del tipo flexible, no prensadas y se montan con un papel de ranura), ya que las tensiones correspondientes a cualquier espesor de película de aire



comprendida en el dominio especificado, es inferior a la tensión de descarga de dichos espesores de películas de aire, aún a temperaturas de operación en carga considerando las clases de aislamiento B o F.

El uso de la igualación de potencial en la superficie de la bobina en la zona de ranura para el nivel de entre 4,2 a 6,6 kV es necesario, y a partir de los 6 kV, ya se entra en forma franca en el rango de la producción de las descargas parciales a temperaturas de operación de las máquinas; pero, aunque se considera muy recomendable el uso de esta superficie conductora en el nivel de 5.000 voltios, muchos fabricantes no la utilizan en esta tensión y montan las bobinas flexibles de esta tensión con un papel de ranura, hecha la salvedad de que el diseño de las ranuras permita el uso de este sistema de aislamiento y la impregnación sea apropiada ( al VPI recomendable).

En la Fig. 5.5 se muestra el caso correspondiente a las bobinas prensadas (rígidas) de los niveles de 10 y 13,8 kV. - Se ve que en estas tensiones es imprescindible el uso de la superficie conductora en la parte activa de las bobinas.

Bajo condiciones de la prueba de tensión aplicada, las bobinas flexibles de los niveles de 2.300 y 4.160 voltios, ostentan un cierto nivel de descargas parciales, pero esta prueba, que es de sólo un minuto de duración, no afecta mayormente al aislamiento, ya que normalmente no se vuelve a repetir.

Fig. 5.4. -Tensión pico bajo condiciones de operación normal de las películas de aire, a 760 mmHg, en bobinas flexibles de 2.300 y 4.160 voltios

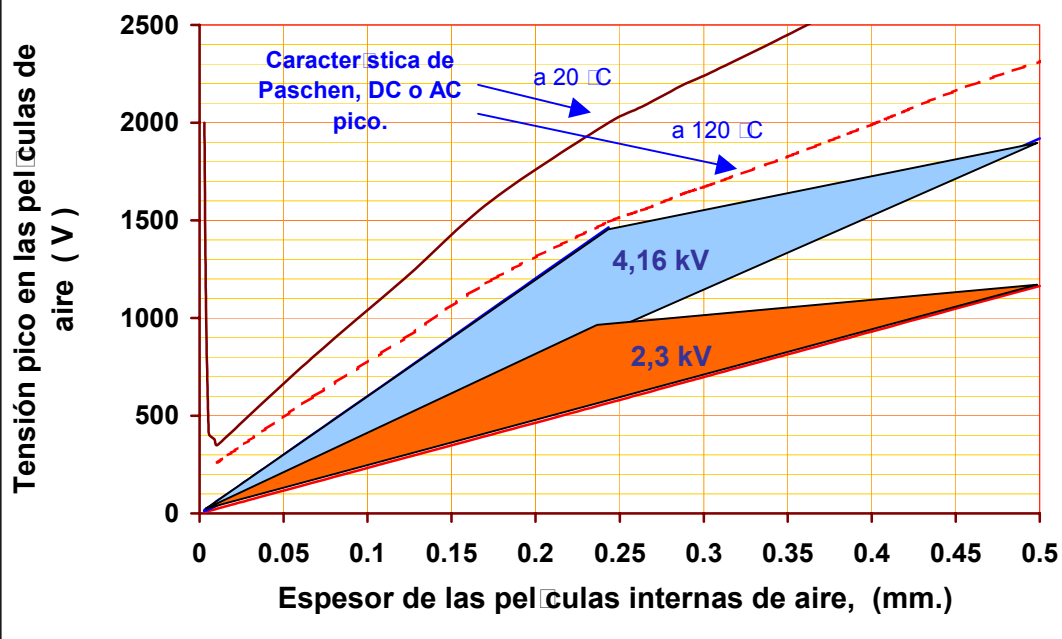
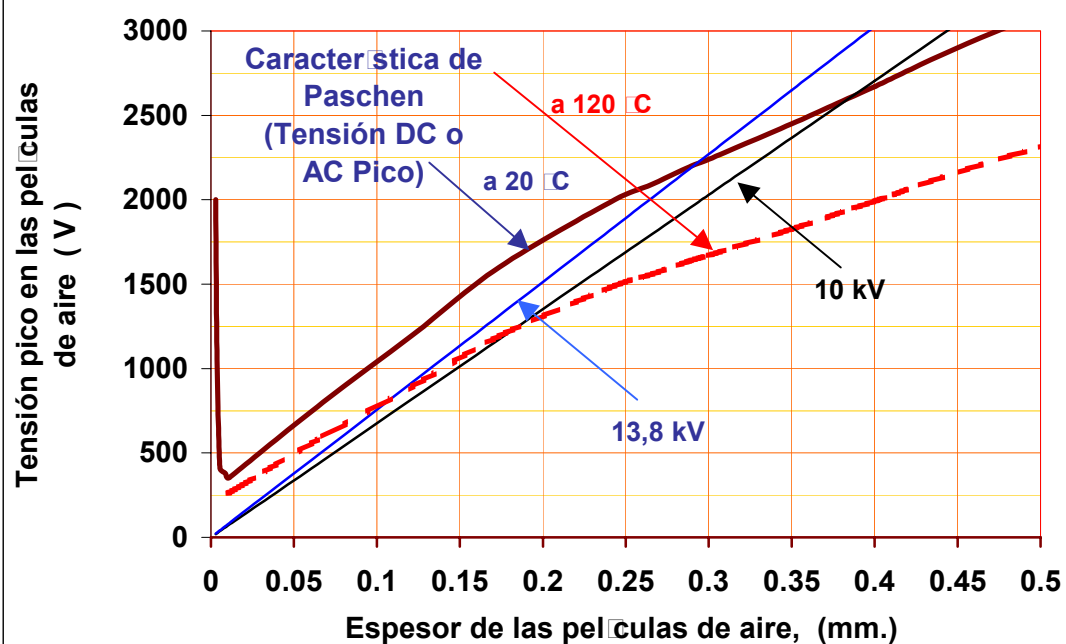


Fig. 5.5.- Tensión en las películas de aire, entre bobinas Rígidas y la pared de ranura. Para sistemas de 10,0 y 13,8 kV

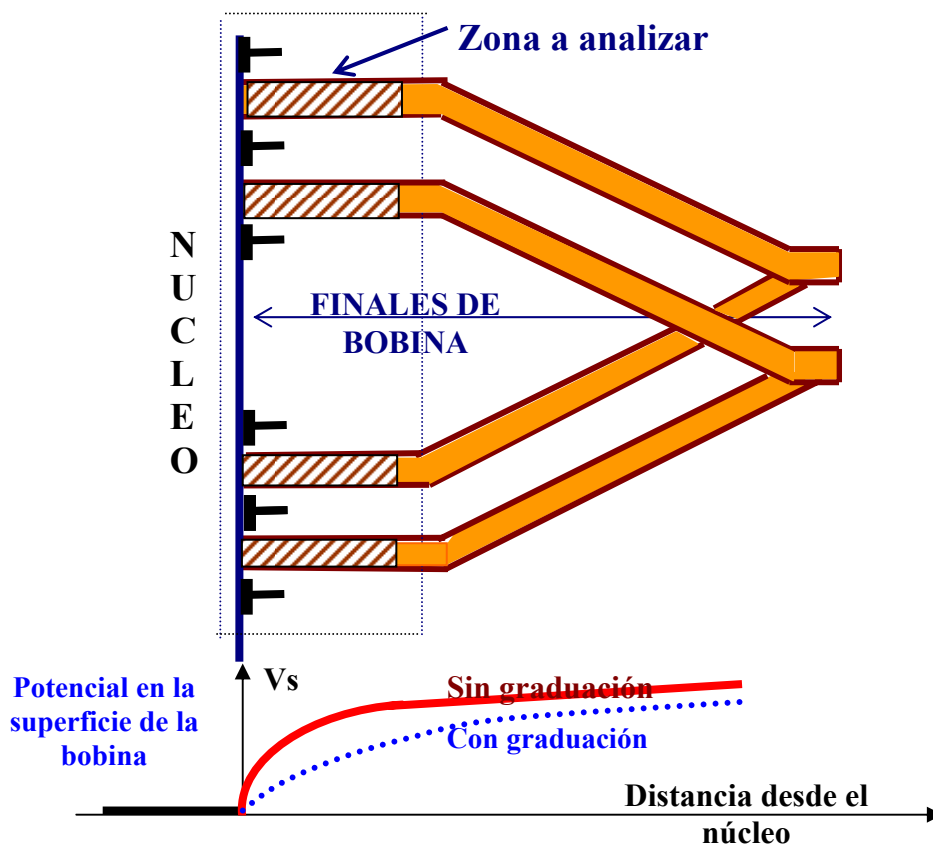


**5.4. -Graduación del gradiente del potencial en la superficie de los lados de bobina, a la salida de las ranuras.** -En los lados de las bobinas, a la salida de las ranuras, resulta una configuración compuesta por ( Fig. 5.6):

- El borde del núcleo y los accesorios de prensado, que se ubican al potencial de tierra;
- El cobre de las bobinas que se prolonga hacia los codos, continuando hacia las narices de bobina, conocidos estos dos últimos como extremos o cabezas de bobina, los cuales quedan al potencial que resulta de la tensión aplicada a la bobina; y
- el aislamiento de los lados y de las cabezas de bobina, cuya superficie exterior, en la zona de ranura, toma el potencial de tierra y a la salida de las ranuras, continuando hacia los extremos de bobina, toma gradualmente casi todo el potencial aplicado al cobre.

El potencial en el aislamiento en la zona de ranura, se distribuye de acuerdo a lo que se ha mostrado en las Figs. 3.9 a 3.25. –En la zona que ahora estamos observando, la cual esta indicada en la Fig. 5.6, tiene interés la distribución del potencial en la superficie exterior del aislamiento.

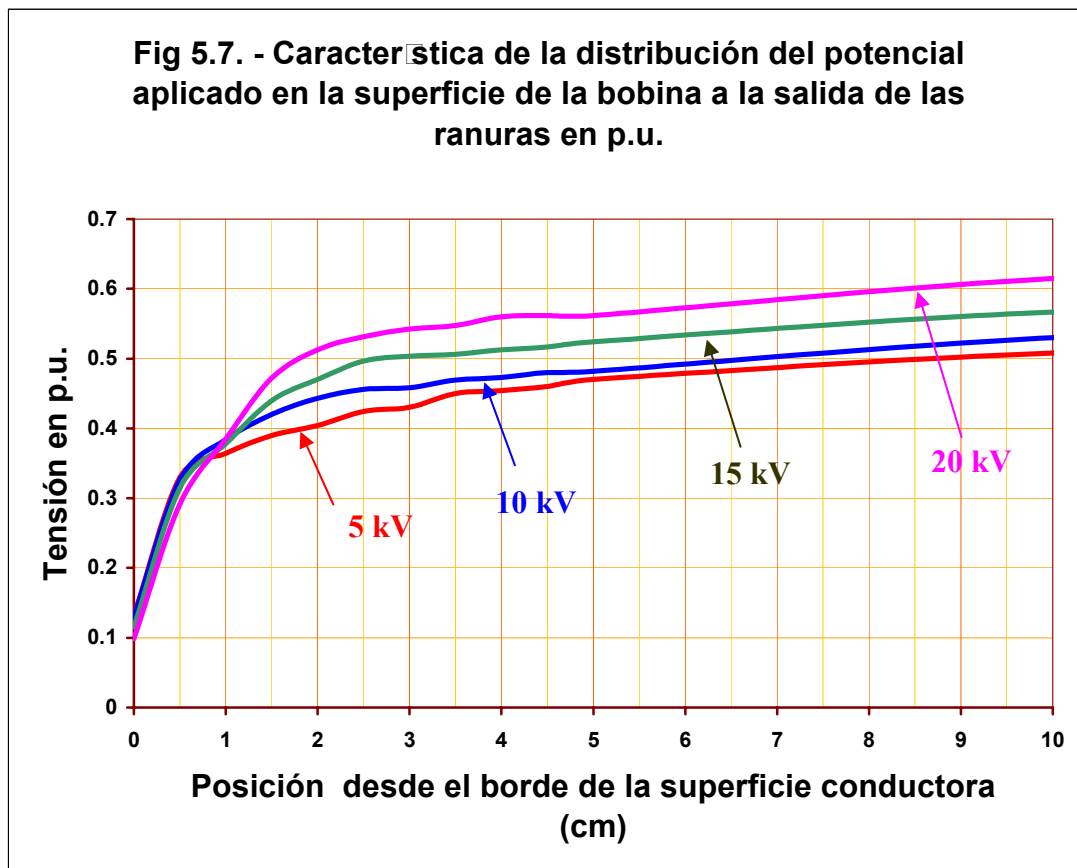
En la Fig. 5.7, se muestra en p.u. el resultado obtenido experimentalmente, de la distribución del potencial en la superficie mencionada, en una barra aislada con 2,0 mm de aislamiento de mica epoxy, con una superficie conductora para la zona de ranura. – El potencial se aplicó al cobre y la superficie conductora se puso a potencial de tierra. – Los puntos de medición del potencial se han tomado desde el borde de la superficie exterior conductora.



**Fig. 5.6. – Esquema de la configuración formada por el núcleo y los finales de bobina.**

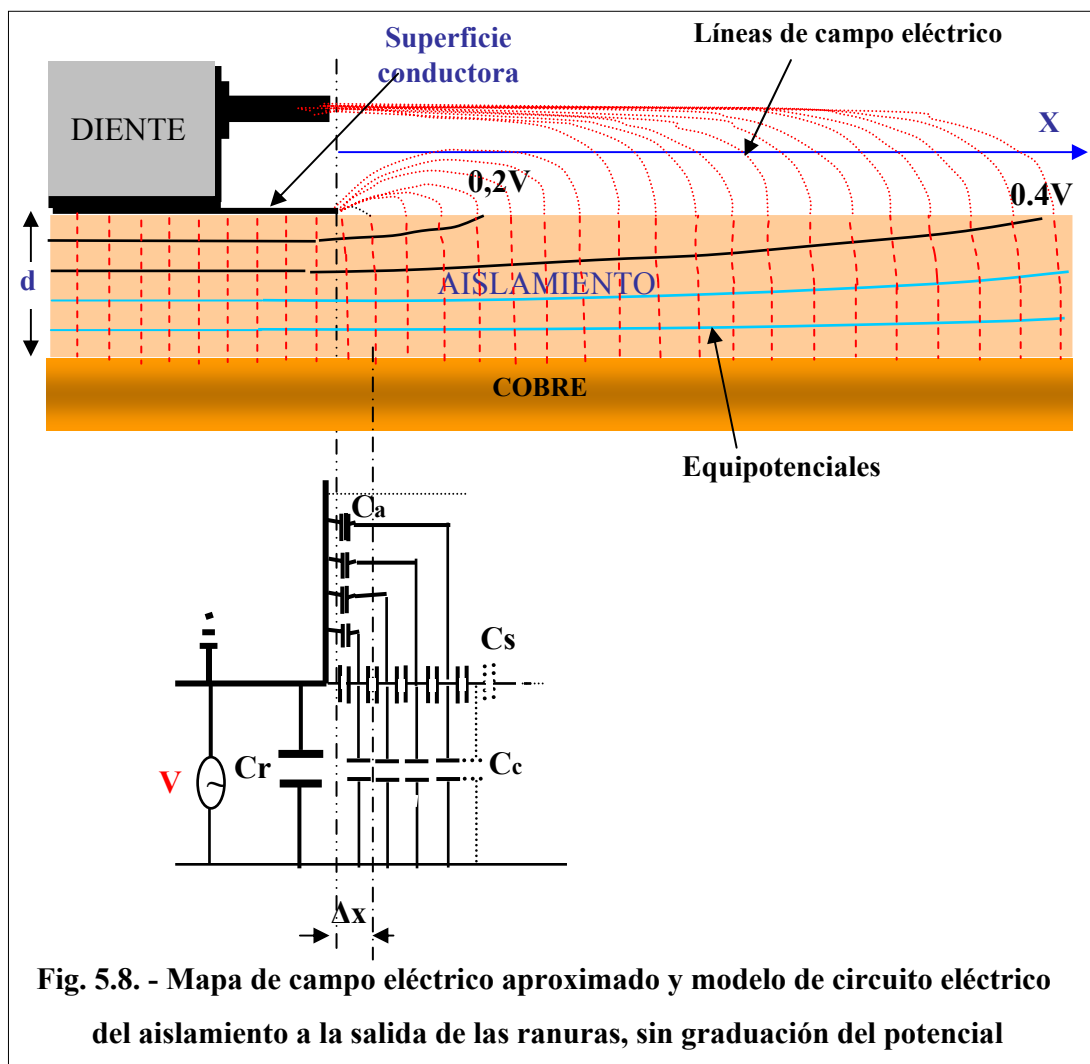
En la Fig. 5.8 se muestra el esquema del circuito eléctrico que representa al sector que nos interesa. -En este esquema los símbolos representan una configuración con parámetros distribuidos [10]

En la Fig. 5.8,  $C_r$  es la capacidad por unidad de longitud, del aislamiento contra masa de la bobina en la zona de la ranura, en Faradio/m.;  $C_c$  es la capacidad distribuida por unidad de longitud del aislamiento de la cabeza de bobina a la salida de ranura en Faradio/m,  $C_a$  son las capacidades de los tubos de flujo eléctrico, en el aire,  $C_s$ , son las capacidades en Faradio/m de la superficie límite entre el aislamiento de la cabeza de bobina y el aire [4],  $d$  es el espesor del aislamiento.

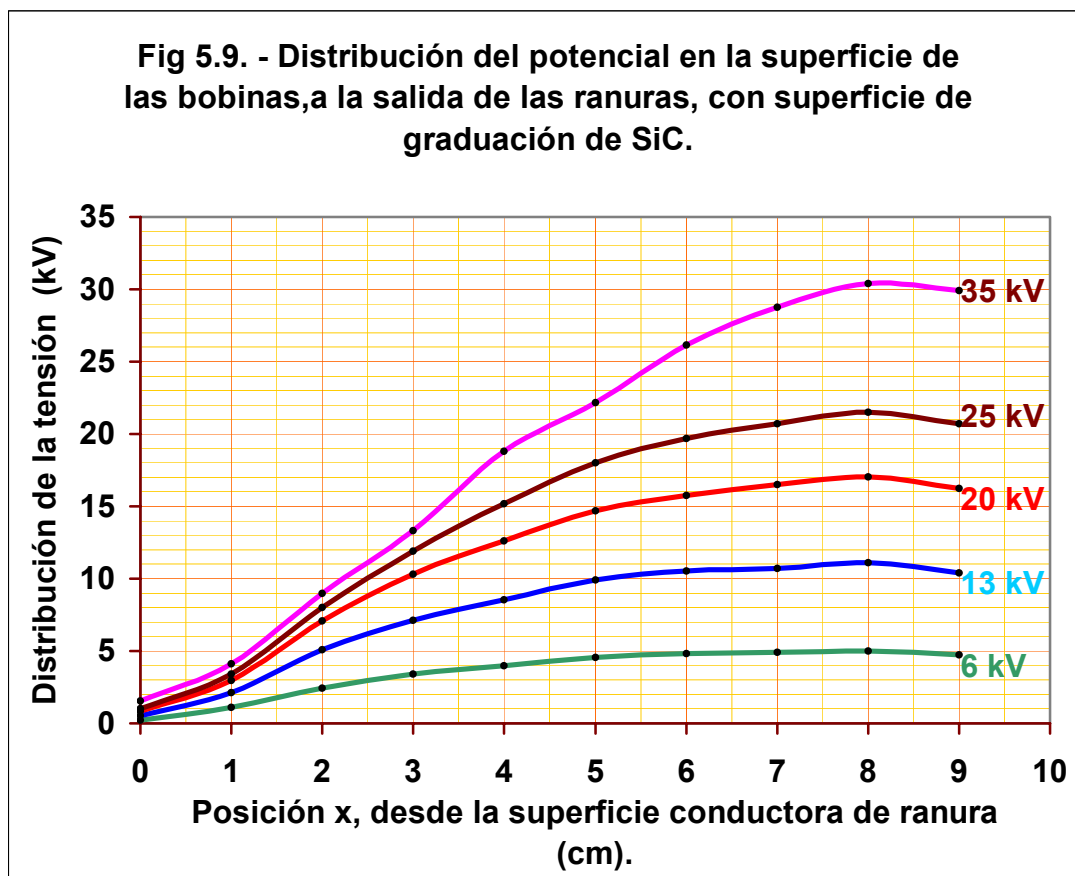


Se puede observar que la aparición del potencial aplicado al cobre, en la superficie del extremo de bobina, por el efecto de división capacitiva con la capacidad del aire, es bastante brusca. - Alrededor del 40 % de la tensión aplicada, aparece en el primer centímetro de longitud junto a la superficie conductora, para ascender ya en forma bastante suave, más allá de los 3 cm del borde de la superficie conductora de ranura. -En el ensayo, se observa la formación de un fuerte anillo de chispas en el borde de dicha superficie, cuando la tensión aplicada es de más de los 12 kV.

Utilizando la información que nos da la Fig. 5.7 y el comportamiento visible de las trayectorias de las descargas con la barra en prueba, se ha confeccionado “a sentimiento” [4], el mapa de campo eléctrico aproximado de la Fig. 5.8



El fuerte anillo de chispas de descargas parciales que se observa a la vista cuando la tensión aplicada a la barra es de unos 12 kV o más, tendría efectos perjudiciales en el aislamiento, pues lo erosionaría en dicha parte, causando finalmente la falla del aislamiento. - En condiciones normales de operación, se observa en las máquinas de 6 kV que se deteriora inclusive la pintura de graduación de potencial que se coloca en ese lugar, por lo que ya a partir de esta tensión, se dispone de algún medio para graduar la aparición del potencial en la superficie de las bobinas y evitar que se produzca la rotura de la rigidez del aire circundante.



Desde el comienzo de la explotación de las máquinas de A.T. se han utilizado varios métodos para evitar o prevenir la erosión del aislamiento, tales como el recubrimiento de esa zona con una tela asbestada resistente al arco, la colocación de anillos para evitar la concentración de campo eléctrico en el borde de la superficie conductora de ranura, terminar la superficie conductora gradualmente con unos anillos de superficie conductora de resistencia progresivamente creciente, y modernamente se han desarrollado las superficies semiconductoras a base de carburo de silicio (SiC) en sus presentaciones, primero como pinturas y actualmente cada vez más usadas, en forma de cintas, más estables y listas para su aplicación tanto para el sistema resin rich como para el VPI.

Estos materiales a base de carburo de silicio, tienen una característica de conducción de la corriente que es dependiente del campo eléctrico, que al ser aplicada en la superficie del aislamiento desde  $x=0$  (Fig. 5.6) hasta cierta distancia del borde de la superficie conductora de ranura, hace el efecto de shunt o de resistencia no lineal en derivación con la capacidad del aire; Modificando la configuración del campo eléctrico en dicha zona y drenando por esta superficie hacia tierra, la corriente de dispersión que atraviesa el aislamiento de las bobinas en la zona de la salida de las ranuras, evitándose de esa forma que esta corriente de dispersión, llegue a través del aire hacia los puntos más cercanos a masa. - Estos materiales se ofrecen con varias características de Corriente Vs. Campo eléctrico.

**5.4.1. -Aplicación práctica de una superficie de graduación del potencial, en barras de máquinas de A.T.** -En la Fig. 5.9 se indican los resultados experimentales de la aplicación de éstas superficies semiconductoras para la linealización del potencial en los extremos de bobina después de la superficie conductora, aplicadas a barras aisladas con 2 mm de espesor de mica epoxy para el nivel de 6.6 kV. – Se considera seguro un gradiente superficial de menos de 5 kV/cm [14]. - En la Fig. 5.10, se muestra la configuración del mapa de campo obtenido de acuerdo al resultado de la Fig. 5.9

**5.4.2. – Análisis ideal de la superficie semiconductor de Carburo de silicio de una sola resistividad [10].** -Para efectos del análisis aproximado del comportamiento de las superficies de graduación del potencial, conviene idealizar la característica de Campo eléctrico vs. Corriente superficial como se indica en la



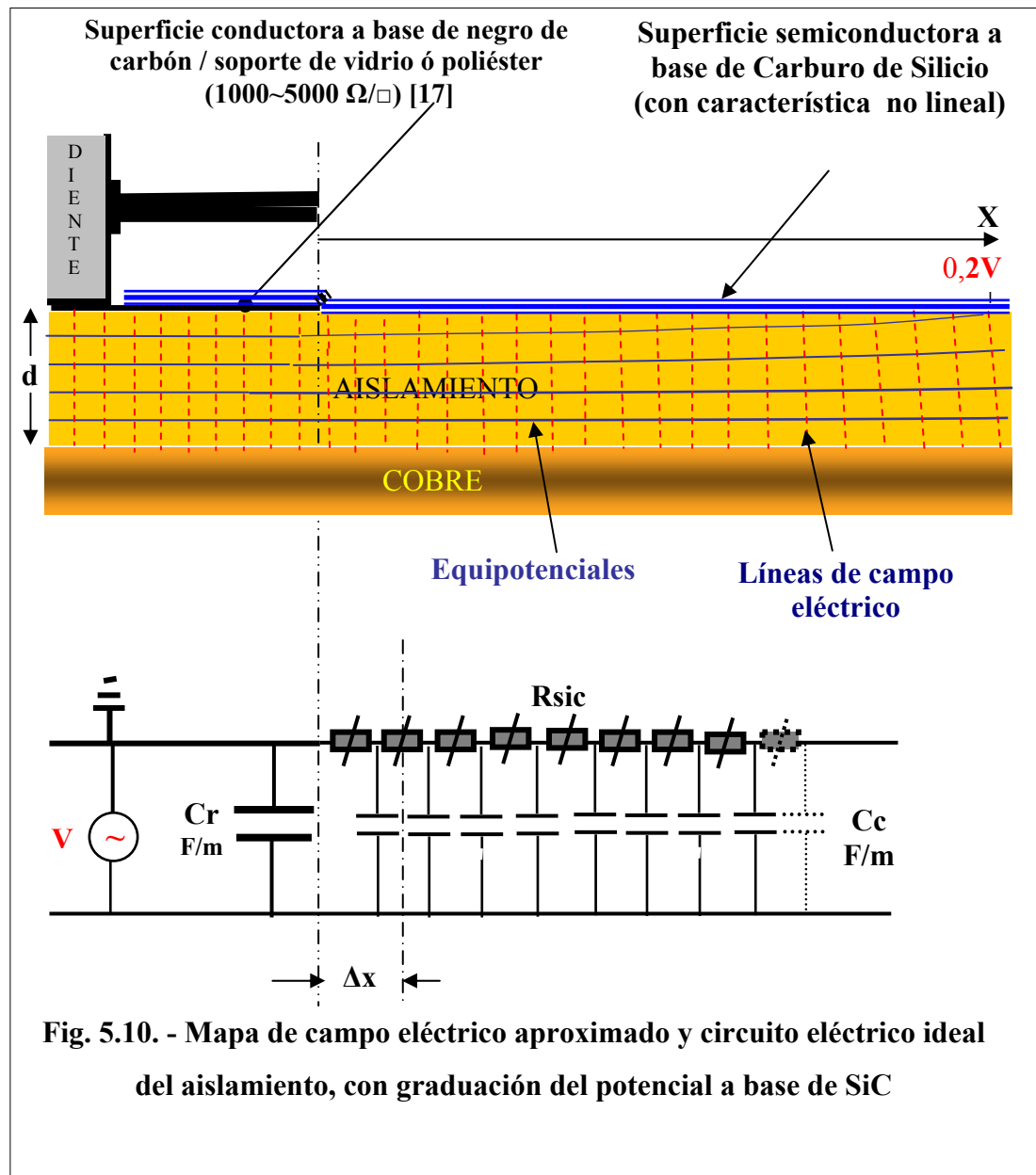
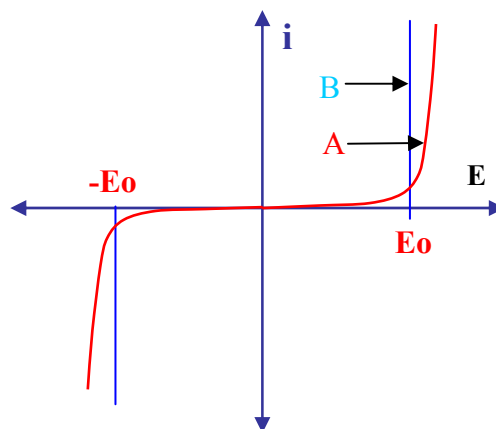


figura 5.11; donde las curvas A y B muestran las características real e ideal respectivamente [10]. -Para la característica ideal no lineal, se asume una curva de pendiente escarpada como la curva B cuya ecuación puede expresarse como:

$$E = \begin{cases} E_0 & i > 0 \\ -E_0 \sim E_0 & i = 0 \\ E_0 & i < 0 \end{cases} \quad \text{Ec. 5.2}$$



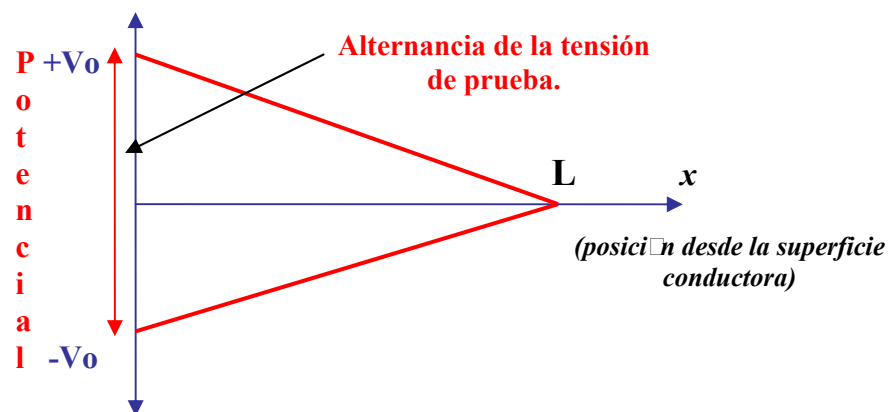
**Fig. 5.11. - Características de las superficies de carburo de silicio.**

**a. – Característica típica. b. –Característica ideal**

donde la constante  $E_0$ , es un valor de campo eléctrico específico, para cada tipo de material de SiC, (carburo de silicio). -Si al cobre de la bobina se pone a tierra, y a la superficie conductora de ranura, se le aplica una tensión de prueba de  $V$  voltios, con un valor pico  $V_0$ , y frecuencia  $f$ , la carga superficial será proporcional al potencial aplicado.

$$Q_S = C_c \cdot v \quad \text{Ec. 5.3}$$

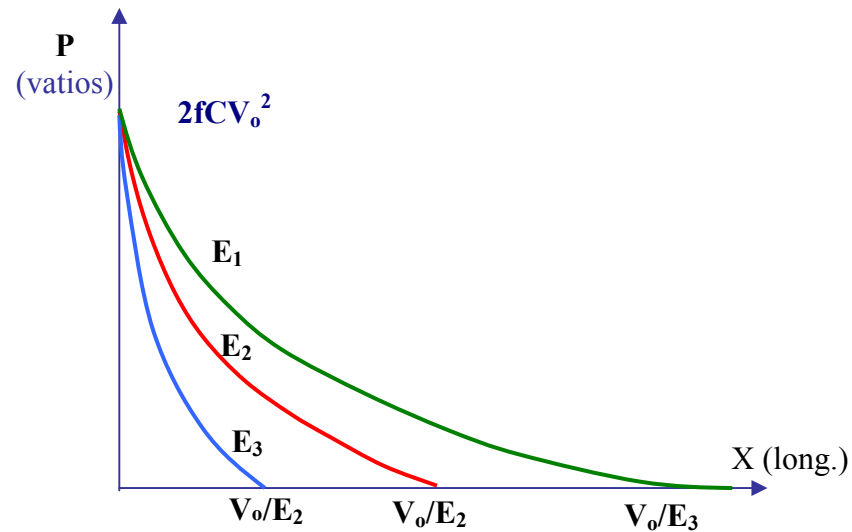
Donde,  $C_c$  es la capacidad por unidad de longitud a lo largo de la cabeza de bobina, debajo de la superficie semiconductor de SiC,  $Q_S$  es la carga superficial instantánea en un punto  $x$  visto desde la superficie conductora y  $v$  es el valor instantáneo de la tensión aplicada. -La distribución del potencial en la superficie semiconductor, con característica de conducción ideal según la Fig. 5.11, se muestra en la figura 5.12, donde la longitud  $L = V_0 / E_0$  es el valor hasta donde ésta superficie tiene efecto y más allá, teóricamente, no tendrá ningún efecto sobre la distribución de carga superficial que fluya hacia  $x=0$ .



**Fig. 5.12. -Distribución del potencial en una superficie simple de carburo de silicio.**

Utilizando las Ecuaciones 5.2, 5.3 y las condiciones de frontera, podemos calcular la distribución de las pérdidas en función de la posición  $x$ , haciendo la aclaración de que en un diferencial de capacidad del aislamiento de la cabeza de bobina,  $C_c \cdot dx$ , en una posición  $x$ , se producirá una determinada carga en la superficie, de acuerdo a la Ec.5.3 y a la característica del potencial dado en la Fig. 5.12 -Entonces, si observamos que cuando la tensión varíe durante un semiciclo desde un valor máximo  $V_0$  hasta el valor mínimo  $-V_0$ , la carga que se encuentre en la superficie, desde cierto valor de la posición  $x$  hasta  $L$ , fluirá en forma de una corriente eléctrica hacia la fuente pasando por la diferencial de superficie (de longitud  $dx$ ), en la posición  $x$ , la que tiene una determinada resistencia superficial y está al potencial  $V_0 \cdot (L-x)/L$ .

La distribución de pérdidas  $\omega$  en una posición  $x$  de la superficie de SiC de longitud  $dx$ , por segundo; se puede expresar como la integral en el tiempo de un



**Fig.5.13.- Distribución de pérdidas en las superficies de graduación de potencial a base de Carburo de Silicio de diferente característica  $E_0$ .**

segundo, del producto de la corriente superficial  $i$  por el campo eléctrico  $E$  en la superficie como:

$$\omega = \int_0^1 E \cdot i \cdot dt = 2 \cdot f \cdot E_0 \cdot \left[ \int_{\text{mediociclo}} i \cdot dt \right] \quad \text{Ec. 5.4}$$

La integral de la derecha en la Ec. 5.4 anterior, se interpreta como la transferencia de carga  $Q$ , de la derecha de la posición  $x$ , en la Fig. 5.12, hacia la fuente la cual se puede evaluar geoméricamente con auxilio de la misma Fig.5.12, con lo que se obtiene el valor de  $Q = Cc \cdot E_0 \cdot (x - L)^2$  que reemplazando en la Ec. 5.4 se obtiene la distribución de pérdidas en la superficie de SiC igual a:

$$\omega = 2 \cdot f \cdot E_0 \cdot Q = 2 \cdot f \cdot Cc \cdot E_0^2 \cdot (x - L)^2 \quad \text{Ec. 5.5}$$

En  $x=0$  las pérdidas son  $w=2 \cdot f \cdot Cc \cdot V_0^2$  y el valor de las pérdidas totales en la superficie semiconductora de SiC se puede expresar como la integral desde  $x=0$  hasta  $x = L$ , de la expresión de las pérdidas en función de la posición  $x$  dadas por la Ec.5.5

$$\omega_{\text{total}} = \int_0^L \omega \cdot dx = \left(\frac{2}{3}\right) f \cdot Cc \cdot V_o^3 / E_o \quad \text{Ec. 5.6.}$$

La Ec.5.6 anterior indica que el calentamiento de una superficie de carburo de silicio es proporcional a la tercera potencia de la tensión de prueba aplicada, lo cual indica que puede haber problemas de calentamiento en la unión entre las superficies conductora y semiconductor de SiC con tensiones de prueba altas.

Debido a esto, con tensiones mayores de operación y/o pruebas, se procede a colocar varias capas de pintura o cinta de SiC, con longitudes escalonadas con el objeto de tener resistencias relativas menores en la superficie de SiC, junto a la superficie conductora, de tal manera de que se gradúe también el calentamiento en la superficie graduadora desde  $x=0$ , [10], [14].

Otros métodos mas complejos de graduación del potencial han sido propuestos y analizados mediante técnicas avanzadas [10], pero para los niveles de tensión usuales, hasta 13,8 kV, se utiliza generalmente lo que se ha descrito, ya sea utilizando cintas o pinturas de Carburo de silicio.

## CAPÍTULO VI

### REFERENCIA A LOS FACTORES DE DETERIORO Y ENVEJECIMIENTO.

**6.1. -Introducción.** -Muchas fallas del aislamiento de las máquinas son ocasionadas por la deposición o absorción de la humedad. - Los materiales aislantes orgánicos tienen una gran afinidad con la humedad de la atmósfera o del medio circundante, por lo tanto es de primera importancia que se efectúen inspecciones periódicas al equipamiento para asegurarse de que no haya ingreso de agua al cuerpo del aislamiento. -La vida utilizable de un sistema de aislamiento termoplástico ha finalizado cuando el aislamiento se ha puesto lo suficientemente quebradizo como para desarrollar fisuras. - Las fisuras resultan de los esfuerzos mecánicos impuestos a los conductores que tienen el aislamiento reseco. - Los esfuerzos mecánicos sobre el aislamiento son causados por:

- Corrientes de cortocircuito,
- Las expansiones térmicas y las contracciones de los conductores y
- La vibración.

El sostenimiento dieléctrico del aislamiento no es significativamente reducido por el estado quebradizo solamente, sin embargo, la falla del aislamiento seguirá rápidamente al desarrollo de la formación de las fisuras.

La principal causa de las fallas en los sistemas de aislamiento termofijos, es la vibración, debido al aflojamiento de las bobinas en las ranuras y al deslaminamiento debido a las expansiones diferenciales.- Los sistemas de aislamiento a base de mica-epoxy han probado ser especialmente propensos a desarrollar el aflojamiento de las cuñas por pérdida del tamaño físico (volumen) y peso (lenta carbonización), conduciendo éstos a la producción de descargas parciales en las ranuras.

Las pruebas para la detección de las descargas parciales en las ranuras y las inspecciones para la identificación de cuñas flojas, y los controles de las vibraciones que afecten los bobinados, son más importantes con los sistemas de aislamiento termofijos actuales.

**6.2. – Factores de deterioro y envejecimiento individuales.-** Existen varios factores de envejecimiento que pueden afectar la vida de un sistema de aislamiento eléctrico en una máquina rotativa. - Estos son:

- La temperatura.
- Los esfuerzos eléctricos,
- Los esfuerzos termomecánicos,
- Los esfuerzos electromecánicos y
- Las condiciones ambientales.

La discusión de los cuatro primeros factores puede encontrarse en la Norma IEEE 434-1981 [24]

**6.2.1. –El envejecimiento térmico.** -El más comprendido de los factores de envejecimiento es el efecto de la temperatura. – Está reconocido que los sistemas de aislamiento, están limitados por su temperatura de operación. – La vida térmica de un sistema de aislamiento es una función inversa de la temperatura de operación a la cual está expuesto. – La pérdida en la capacidad de aislar se hace evidente por un cambio en las características eléctricas ó mecánicas, cualquiera de los cuales puede no ser compatible con la operación segura de las máquinas.

Los aislamientos, no están constituidos por un solo tipo de material, sino que son estructuras compuestas, estratificadas, de alta tecnología, en la que mediante una adecuada estratificación se obtienen unas cualidades que no lo tienen sus elementos en forma separada.

Como se ha mostrado en los Capítulos III y IV, el esfuerzo en los puntos críticos de las configuraciones capacitivas que se forme en un sistema de bobinas, especialmente en las zonas de sus bordes en la parte activa o en las curvas exteriores en las cabezas de bobinas, darán lugar a concentraciones de campo eléctrico y por lo tanto a puntos de alto esfuerzo dieléctrico localizados, en los que debido a la densidad de energía desarrollada en esos puntos del aislamiento (puntos calientes) harán que un sistema de aislamiento visto como un todo, no necesariamente deba responder a la clase de aislamiento a la que supuestamente deba pertenecer según la clase de aislamiento de los constituyentes utilizados. -Se concluye por lo tanto, que no se puede decir a priori que un sistema de aislamiento deba tener una performance



dentro de lo estipulado por el índice de temperatura de sus constituyentes según la clase térmica particular de cada uno de éstos.

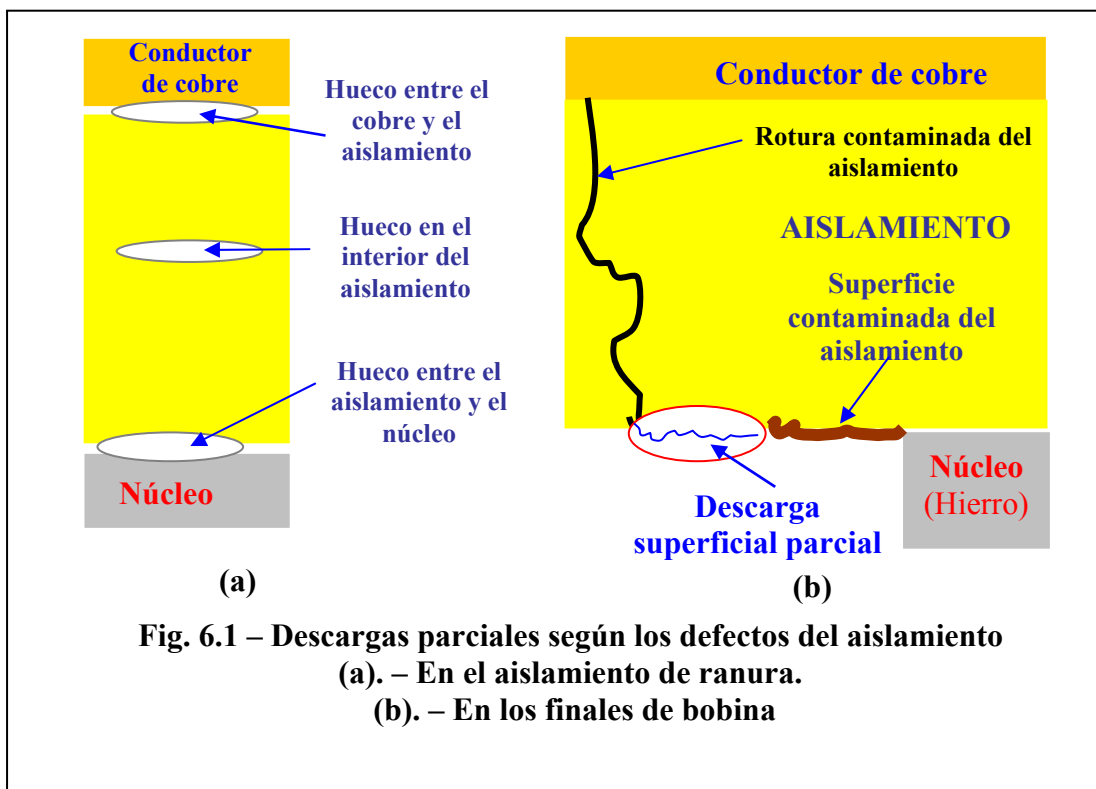
Como referencia, existen varios procedimientos de pruebas [24], [25], [30] para la comparación de la evaluación del envejecimiento térmico del aislamiento de las máquinas rotativas que trabajan en condiciones normales refrigeradas por aire, las que evalúan sólo los efectos en la vida térmica del aislamiento y donde sólo los efectos térmicos son acelerados. -Los otros factores (eléctricos, mecánicos, ambientales) son usados solamente como medios de diagnóstico para detectar los efectos de la degradación. -Estos procedimientos se aplican en laboratorios especializados en el mundo desarrollado.

Estas normas establecen procedimientos de pruebas para efectuar la comparación de dos o más sistemas de aislamiento de acuerdo con su expectativa de vida a temperatura nominal.- Los procedimientos según la norma están dirigidos a la evaluación de los sistemas de aislamiento para las máquinas eléctricas AC grandes, que utilizan bobinas preformadas [24], para máquinas con tensiones de 6900 voltios o menos [30], y para máquinas con sistemas de aislamiento sellados de 6900 voltios o menos [25].- El propósito de los procedimientos es clasificar los sistemas de aislamiento de las máquinas comprendidas en su alcance, de acuerdo con los límites de temperatura que se obtengan mediante los tests propuestos, en vez de hacerlo mediante su composición química. - Estas normas exigen primero, que los materiales aislantes componentes del aislamiento a ser evaluado, sean primero probados mediante los tests de norma correspondientes.

La mejor evaluación de un sistema de aislamiento térmicamente deteriorado y por lo tanto usualmente quebradizo, se obtiene mediante la exposición al esfuerzo mecánico y finalmente a la aplicación de tensión de prueba relativamente prolongada (de unos 10 minutos). - Las normas de prueba, indican los procedimientos para aplicar chequeos periódicos mediante la aplicación de tensión, precedidos por períodos de esfuerzo mecánico y humedecimiento con el objeto de establecer un punto final en la vida del aislamiento en prueba, mediante la producción de la falla eléctrica.

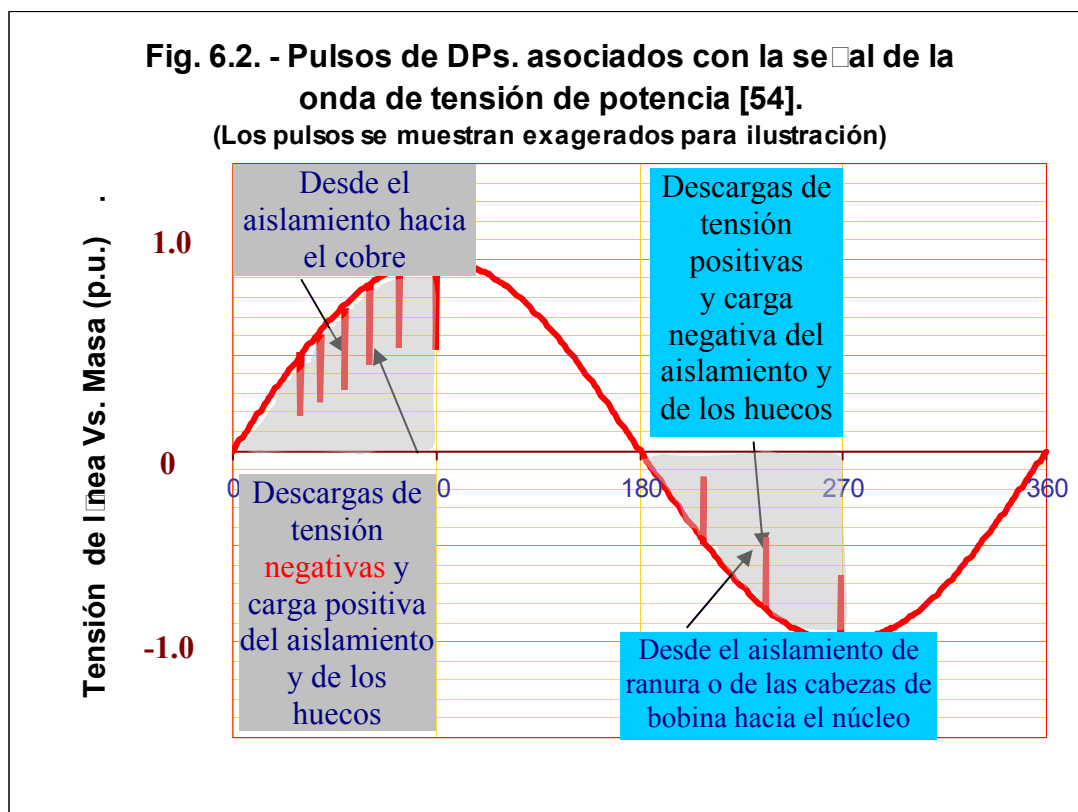
En la evaluación térmica de sistemas de aislamiento sellados [25], se efectúa la exposición a la temperatura en un ambiente saturado de humedad, luego el ensamble completo de las bobinas en prueba y su base –estator, es sumergido en agua tratada y al final de la inmersión, debe ser realizada una prueba de tensión aplicada con una tensión igual a 1.15 veces la tensión nominal del modelo de máquina, durante un minuto, entre todos los conductores y el agua puesta a masa, luego se continúa con la rutina de exposiciones a la temperatura y a los tests de verificación hasta encontrar el punto final de cada bobina.

**6.2.2. –El envejecimiento debido a la tensión aplicada en función del tiempo.** - El segundo factor de envejecimiento mas conocido es el esfuerzo eléctrico ( IEC 727-1982) - La sola aplicación de la tensión a un aislamiento eléctrico, conlleva a una lenta carbonización que se traduce en la curva de rendimiento del aislamiento frente a la tensión aplicada en función del tiempo, como el mostrado en la Fig.1.4



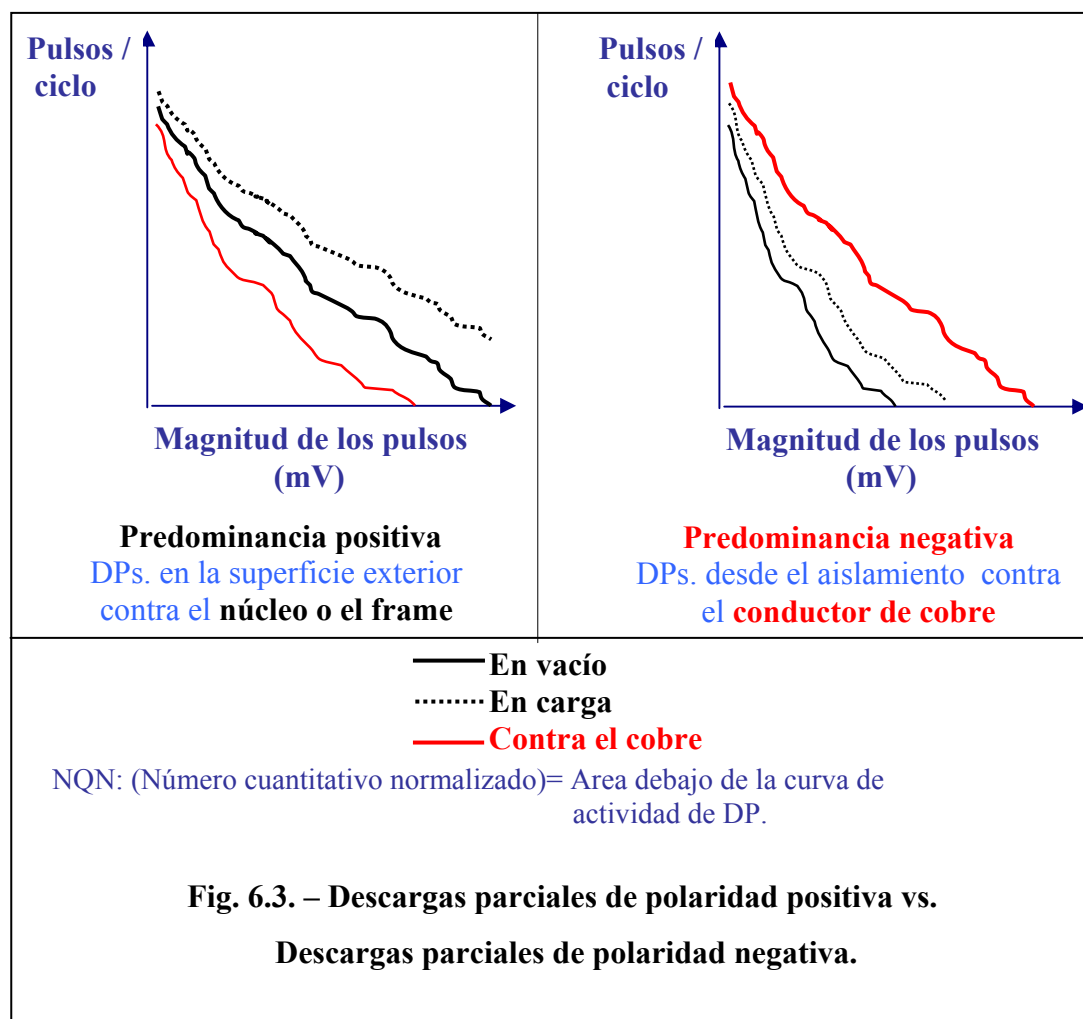
**Fig. 6.1 – Descargas parciales según los defectos del aislamiento**  
**(a). – En el aislamiento de ranura.**  
**(b). – En los finales de bobina**

El aislamiento eléctrico que opera con esfuerzos de campo alto, está sujeto a influencias de envejecimiento no presentes a niveles bajos de esfuerzo.- Las descargas parciales (corona) pueden causar la degradación del aislamiento en dos formas: por efectos químicos y por bombardeo de iones.- Esto ocurre cuando el gradiente de tensión ( o sea, el campo eléctrico) en las moléculas de gas en los espacios vacíos que existan o que se hayan producido en el cuerpo del aislamiento, excede de cierto valor, dependiendo de la naturaleza del gas y de su presión y temperatura. - Puede formarse el ozono y óxidos de nitrógeno que pueden atacar los materiales orgánicos en el aislamiento.- Los síntomas de esta clase de degradación son unos depósitos rojizos o blancos.- Los resultados del efecto corona, no están



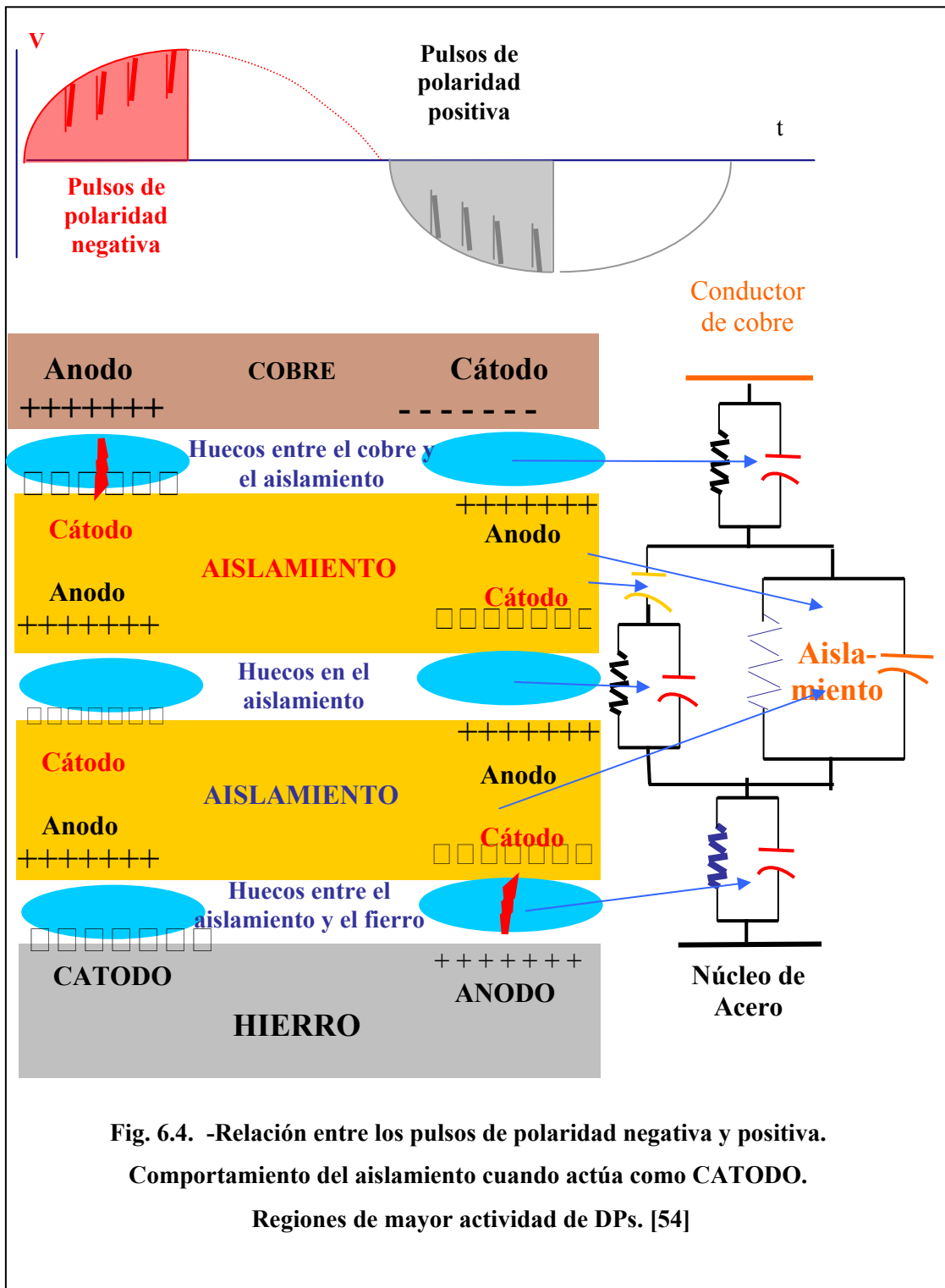
presentes en un grado apreciable en las máquinas enfriadas con hidrógeno, ya que en éstas, el contenido de oxígeno es pequeño [26]







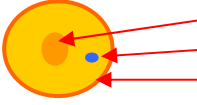
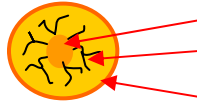
El otro efecto destructivo del efecto corona, está presente, cuando el esfuerzo de la tensión alterna aplicada, es suficientemente alta como para ionizar las moléculas de gas en los espacios vacíos, convirtiéndolas por ello en partículas cargadas. Durante el medio ciclo positivo de la tensión aplicada, ellas son impelidas en una dirección; algunas de ellas impactan contra las moléculas del aislamiento sólido en la pared del hueco. - Durante el ciclo negativo, estos proyectiles son conducidos en la dirección opuesta. - Así cada ciclo de la corriente alterna somete al aislamiento a dos andanadas de ionización. - En ciertos aislamientos orgánicos, los átomos de oxígeno



e hidrógeno, pueden partir de las partículas de carbón, dejando las familiares dentritas o formaciones de ramificaciones, llamadas “tracking”, que se convierten en caminos de carbón conductores.

**6.2.3. –El deterioro debido a las fuerzas termomecánicas.** - Los daños ocasionados por las fuerzas termomecánicas son más pronunciados en los bobinados de las máquinas sujetas a carga y temperatura fluctuantes y se presentan generalmente en generadores de turbina enfriados convencionalmente, generadores



Modelo de aislamiento	Condición del aislamiento	Resistencia de aislamiento	Prueba de índice de polarización	Prueba de Alto potencial	Prueba de descargas parciales.
	Buena	Alta	Muy Bueno	Linealidad de la corriente de fugas vs. tensión: casi lineal	Actividad de DPs. no medible.
	Regular	Relativamente alta	Bueno	Linealidad de la corriente de fugas Vs tensión: Relativamente curvada pero estable.	Mínima actividad de DPs. – Descargas positivas y negativas balanceadas.
	Seco pero con el aislamiento deslaminado.	Resultado falsamente alto	Resultado falsamente bueno.	Corriente de fugas vs. tensión falsamente lineal	Se observan DPs.. Un examen cuidadoso revela problemas que no son apreciados con los métodos tradicionales.
	Pobre. – Requiere limpieza o reimpregnación si es el caso	Bajo	Pobre	Corriente de fugas alta. –Puede requerir se limite la tensión de prueba.	Alto nivel de DPs. positivas indican probable formación de descargas superficiales
	Inaceptablemente bajo. Requiere reparación mayor o rebobinado			Posible falla durante la prueba de Hi-pot.	Alto nivel de DPs. negativas indican huecos internos cerca del conductor de cobre.
	Condición cerca de la falla. – Los arcos de las DPs. han causado carbonización de los huecos y quemaduras superficiales en las Cabezas de bobina.	Muy bajo	Muy bajo	Corriente de fugas alta y probable falla durante la prueba	Mínima actividad de las DPs. – El arco de las DPs. ha progresado al punto que se ha producido daño permanente al aislamiento
<div style="display: flex; justify-content: space-between; align-items: flex-start;"> <div style="width: 60%;">  <ul style="list-style-type: none"> <li>Conductor de cobre</li> <li>Hueco en el aislamiento experimentando DPs.</li> <li>Superficie exterior del aislamiento</li> </ul>  <ul style="list-style-type: none"> <li>Conductor de cobre</li> <li>Caminos de descargas causados por las DPs..</li> <li>Superficie exterior</li> </ul> </div> <div style="width: 35%; text-align: center;"> <p><b>Descripción de los modelos del aislamiento</b></p> </div> </div>					

**Tabla 6.1. – Resultado de las pruebas de descargas parciales respecto de las pruebas usuales**

<b>Resultados de los tests de DPs.</b>	<b>Posible origen de la causa de las DPs.</b>	<b>Acciones correctivas de corto plazo.</b>	<b>Acciones correctivas a largo plazo</b>
Magnitud y tasa de repetición de las DPs. Moderada a baja	-DPs. normales -Comienzo de la actividad de las DPs. -Aislamiento cerca de la falla	A la primera indicación repetir el test on-line en tres meses.  Si el aislamiento es viejo y muestra signos externos de uso, o alguna evidencia de quemaduras por DPs. superficiales, planificar la salida de servicio, para una prueba tradicional de Resistencia de aislamiento	Si el nivel de las DPs es el problema, volver a probar dentro de los 6 meses o como sea planeado  Si el aislamiento está cerca de la falla, el test tradicional de resistencia de aislamiento debe indicar valores bajos.
Predominancia de los pulsos de polaridad positiva	-Huecos en la ranura entre el aislamiento y el núcleo -Caminos de descargas superficiales carbonizados en las cabezas de bobina.	Igual que lo anterior	Programar una limpieza in situ, o en una casa de reparaciones y reimpregnar previa reparación de la sujeción de las cabezas de bobina.
Predominancia de los pulsos de polaridad negativa	-Huecos en la interfase interna cobre / aislamiento.	Igual que lo anterior	Evaluar el rebobinado y programar pruebas fuera de servicio, con la expectativa de que los problemas sean menores.
Balance entre los pulsos de polaridad positiva y negativa.	-Huecos en el interior de la pared del sistema de aislamiento.	Igual que lo anterior..	Evaluar el rebobinado y una salida de servicio mayor.

**Tabla 5.2. – Interpretación de los datos de los tests de descargas parciales en las maquinas de AT y las acciones correctivas [ 54 ]**

hidráulicos, condensadores síncronos, motores síncronos, y no en aquellos generadores de turbina con bobinas directamente enfriadas. - Para la evaluación de los sistemas de aislamiento nuevos o en uso, respecto de otros sistemas conocidos en lo que se refiere a la funcionalidad frente a los esfuerzos termomecánicos, aplicados individualmente, existen algunas normas entre ellas la IEEE Std. 434 [24]



para efectuar los tests de comparación que se realizan en laboratorios especializados en el mundo industrializado.

**6.2.3.1. -Naturaleza de los esfuerzos de deterioro termomecánicos.** -Las expansiones y contracciones diferenciales del conductor, respecto de la estructura magnética y del sistema de aislamiento, pueden causar daños al aislamiento contra masa.. - Los fenómenos, varios de ellos conocidos como la separación del encintado, rotura de los amarres y migraciones del compound del aislamiento, son en principio una función de:

- Las características mecánicas del sistema de aislamiento
- La expansión térmica diferencial entre el cobre de las bobinas del estator y el fierro en el núcleo de la armadura debido a la diferencia entre sus coeficientes de expansión térmica ( tabla 1.1)
- El número de ciclos térmicos.
- El grado de fijación del bobinado en las ranuras.

Esta separación ocurre generalmente en la región de la barra en los extremos del núcleo, mientras el cobre de la barra se expande axialmente, el encintado en la ranura es retenido por fricción contra el hierro, mientras el encintado más allá de la ranura tiende a moverse junto con el conductor. - Esto impone una carga de tensión mecánica de desgarramiento sobre el aislamiento que puede, en algunas condiciones, causar la separación del encintado o la rotura del amarrado. -Las roturas están fundamentalmente asociadas con el debilitamiento del aislamiento de la pared de

ranura, sometido a tensión de desgarramiento entre capas del encintado, o entre capas de mica o ambos. -Esto resulta en un ligero movimiento relativo entre componentes adyacentes en la pared del aislamiento a tierra. -Al enfriarse, el proceso puede no revertirse como para producir el cierre de las micro fisuras, debido a la naturaleza inelástica, dirección del espiral de la cinta, etc. del sistema de aislamiento. Los ciclos térmicos sucesivos pueden incrementar la abertura, o rotura, hasta que finalmente, la fisura se extiende en un número suficiente de capas de mica como para convertir al aislamiento en no confiable.

**6.2.4. –Envejecimiento de origen electromecánico [24].** – Los conductores aislados e instalados en las ranuras, cuando conducen la corriente de carga, están sujetos a fuerzas que resultan de la interacción con el flujo de dispersión a través de las ranuras y con el flujo principal, que en los generadores pulsa a dos veces la frecuencia del sistema (debido a la atracción desigual de los flujos directo y en cuadratura) [44] - Con las densidades de corriente típicas en los generadores fabricados actualmente, los niveles de presión que resultan en las ranuras son de  $0.5 \text{ N/mm}^2$  hacia el fondo de las ranuras y de un 5 al 10 % de ese valor hacia las paredes laterales de las ranuras [14]

Con el objeto de prevenir vibraciones indebidas, los lados de las bobinas deben ser instaladas lateralmente ajustadas en las ranuras y en la dirección radial deberán ser firmemente acuñadas. –El problema que se presenta al efectuar un bobinado nuevo es que casi un 50 % del volumen de la ranura es ocupado por el aislamiento, el cual está compuesto con hasta un 40 % de material termoplástico o con

características de deformación plástica a altas temperaturas, inclusive con los sistemas mica-epoxy [14]

En [24] se describen los métodos de prueba que permiten efectuar comparaciones de la capacidad entre sistemas de aislamiento nuevos o en uso vs. otros sistemas de aislamiento conocidos y comprobados, para sostener las fuerzas electromecánicas.

Los efectos producidos por las fuerzas electromecánicas son:

- El gran impacto de las fuerzas producidas por un cortocircuito imprevisto, que puede romper o fracturar el aislamiento de las bobinas. -Las fuerzas de cortocircuito son usualmente más destructivas en la posición de salida de ranura de las bobinas, para su evaluación puede encontrarse en [46].
- La corriente de carga normal, producirá fuerzas que establecerán vibraciones, y causara fatiga o envejecimiento del aislamiento debido a la abrasión.-La vibración puede causar daño en la zona de ranura o en los finales de bobina.

**6.2.5. –El deterioro debido a las influencias medioambientales.** -La contaminación deteriora el aislamiento eléctrico al conducir corrientes sobre las superficies aisladas o al atacar al material aislante, reduciendo sus cualidades de aislamiento eléctrico, reduciendo su fortaleza física, o aislando térmicamente al aislamiento eléctrico haciendo que éste opere a temperaturas más altas que sus temperaturas normales de operación, o cambiando la configuración de los esfuerzos dieléctricos en la zona de las cabezas de bobina. -Tales contaminantes incluyen los siguientes:

- Agua o humedad extrema.
- Aceite o grasa, incluyendo lubricantes de extrema presión y antidesgaste inestables.
- Partículas y suciedad conductoras.
- Partículas y suciedad no conductoras.
- Químicos de la industria.

La humedad en la mayoría de los casos es reconocida como la mayor causa de la variación de las propiedades del aislamiento eléctrico. – Puede causar muchos tipos diferentes de fallas bajo el esfuerzo eléctrico aplicado. – La absorción de la humedad en el aislamiento sólido, tiene el efecto gradual de incrementar las pérdidas dieléctricas, reducir la resistencia de aislamiento y puede también contribuir a un cambio en el sostenimiento dieléctrico. –La presencia de la humedad condensada en el aislamiento, permite que las sobretensiones dañen y denuncien las fisuras y porosidades en el aislamiento y puede incrementar el envejecimiento térmico. - La protección de un generador o de una máquina contra los efectos de la humedad debería comenzar cuando la máquina es manufacturada, y se convierte en un proceso de nunca acabar, hasta que la máquina es finalmente retirada del servicio.

El agua tiene efectos destructivos en muchos componentes de las máquinas rotativas así estén en operación, paradas, o desmontadas para inspección, [45]

La norma IEEE Std 43-2000 esta dirigida especialmente para la ejecución de los tests necesarios para la verificación de la condición del aislamiento con referencia al

estado de la superficie respecto de la contaminación y del estado del cuerpo aislante respecto de la humedad.

Los tests funcionales previstos en las normas [24] no incluyen tests separados para la evaluación de estas influencias (aislamientos en ambientes con atmósferas con gas, humedad, vapores de aceites, suciedad de carbón, contaminación de frenos, y otros contaminantes. -Las máquinas grandes a menudo tienen sistemas de enfriamiento cerrados que permiten control sobre los contaminantes. - El medioambiente donde operan estas máquinas, es de tal manera más severo, en su efecto sobre el aislamiento que dentro de la máquina. - Se parte de que un sistema de aislamiento que se evalúa en un laboratorio de pruebas, soporta los medioambientes normales y los contaminantes. [24], [25]

**6.3. -Los factores de deterioro y envejecimiento múltiples.-** El interés por la confiabilidad y la vida de servicio adecuada de los equipos eléctricos de diseño y manufactura económica, esta motivando cada vez mas a los fabricantes y usuarios a considerar métodos mas avanzados de evaluación del aislamiento en vez de solamente considerar los métodos de prueba convencionales o la mera referencia a las tablas de clasificación. -La necesidad de comprender los mecanismos actuales del envejecimiento y la falla del aislamiento en servicio, y para simular aquellos apropiadamente, en pruebas de laboratorio, está conduciendo a nuevas aproximaciones, referentes a métodos de envejecimiento, procedimientos de diagnostico, y a la interpretación final de los resultados de las pruebas. Desde que

los aislamientos de los equipos en servicio, usualmente están sujetos a la acción de diferentes factores de influencia, en muchos casos son consideradas la realización de pruebas con múltiples factores de influencia.

La Norma IEEE Std.1064-1991 [43] que es análoga de la IEC 792 contiene descripciones de problemas técnicos, y posibilidades prácticas, que pueden ser útiles como guía o como lista de chequeo a este respecto.

En las normas [43], se pueden encontrar definiciones que se refieren a los tests funcionales de envejecimiento bajo múltiples factores de influencia, como las siguientes:

- **Interacción.-** Es la modificación del tipo o grado de envejecimiento producido por la combinación de dos o más factores de influencia, relativa a la suma de sus efectos de envejecimiento, cuando actúan individualmente en objetos separados.
- **Sinergismo.** - Es el cambio en las propiedades que no es igual, a la suma del cambio de las propiedades producidas por dos esfuerzos actuando solos. El synergismo puede ser positivo o negativo.
- **Factor de influencia.** -Es un esfuerzo físico específico, impuesto por la operación, medioambiente, o prueba, que influye en el performance de un material aislante, sistema aislante o equipo eléctrico.

La norma [43] que está basada en la IEC 792 establece los procedimientos y la interpretación de estas pruebas de envejecimiento.

## **CAPÍTULO VII**

### **NORMAS DE PRUEBA DEL SISTEMA DE AISLAMIENTO DE LAS MÁQUINAS DE CORRIENTE ALTERNA DE ALTA TENSION.**

**7.1. -Introducción.** -Existe una amplia normalización referente al tema del aislamiento de las bobinas de las máquinas rotativas en general y concretamente referente al aislamiento de las bobinas y bobinados de corriente alterna. – Estas normas están dirigidas principalmente a la evaluación del sistema de aislamiento en dos instancias o perspectivas a. - Al control de la calidad de las bobinas desde la perspectiva del fabricante y del comprador y b.- Al control y evaluación de la condición del aislamiento desde la perspectiva de la Ingeniería de Mantenimiento.

Si bien el control de calidad del aislamiento implica primero, los tests de los propios materiales constituyentes, es decir, aquellos tests que los fabricantes de los aislamientos indican en las hojas técnicas de estos productos (ver la Tabla 7.1); los tests que se refieren a las bobinas y a los bobinados instalados en el proceso de fabricación y o en el control durante la vida del aislamiento de los bobinados, son principalmente los siguientes y existen en diferentes versiones de las instituciones como la IEC, NEMA, IEEE, UNE etc.

- especificaciones para el conductor de cobre y para los conductores de cobre aislados con esmaltes, fibras, filmes y cintas (forma, dimensiones,

características, etc ), (ASTM B48-00, ASTM D149-97a, etc)

- Técnicas para las pruebas de Alta tensión [29]
- Procedimientos de pruebas para los motores y generadores de Inducción [52]
- Procedimientos de prueba para las máquinas síncronas [51]
- Medición de la tangente del ángulo de pérdidas ( $\tan\delta$ ), [26], [27], [36]
- Pruebas del aislamiento entre espiras de las bobinas preformadas [22], [28]
- Evaluación de la suficiencia de los sistemas de aislamiento para sostener los impulsos [23]
- Procedimientos para la evaluación de la capacidad térmica de los sistemas de aislamiento en bobinas preformadas [25], [30], [47]
- Evaluación de la duración los sistemas de aislamiento bajo los diferentes

Ítem	Característica	Norma de referencia
1	Espesor	IEC 371-2, IEC 394-2, IEC 554-2, IEC 626-2
2	Peso total por unidad de Área	IEC 371-2, IEC 394-2, IEC 554-2, IEC 626-2
3	Componentes: contenido de Samica ®, Resina, Tela de vidrio, Poliéster, etc	IEC-371-2, IEC 394-2, IEC 626-2
4	Resistencia a la tensión	IEC-371-2, IEC 394-2
5	Porosidad	ISO 3687
6	Contracción	DIN 40634
6	Clase Térmica	IEC-85
7	Tensión de rotura	IEC-371-2
8	Sostenimiento dieléctrico	ASTM D149-97
8	Etc, etc	....

**Tabla No.7.1 –Algunas Normas de prueba de los materiales aislantes.**



tipos de envejecimiento, actuando solos o combinados [24], [43], [49]

- Evaluación de la resistencia de aislamiento [20]
- Pruebas de suficiencia del aislamiento con corriente continua [21]
- Pruebas de la suficiencia del aislamiento con alta tensión a muy baja frecuencia (0.1Hz), [48]
- Evaluación de la condición del aislamiento [26], [27], [45]
- Etc.

### **7.2. -Tests para determinar la funcionabilidad de un sistema de aislamiento.-**

Estos tests se aplican como parte de los programas de las pruebas de envejecimiento y han sido descritos en líneas generales en el capítulo anterior. – Dichos programas de pruebas están dirigidos a evaluar la capacidad de un sistema de aislamiento para soportar los efectos del envejecimiento térmico, de la tensión aplicada, de los esfuerzos termodinámicos, electrodinámicos y frente a los efectos ambientales. - Las pruebas con alto potencial que se aplican en estos tests como factor de diagnóstico, están dirigidos a determinar el punto final de cada espécimen en prueba con fines estadísticos [23], [24], [25], [30], [47], [49]

### **7.3. -Pruebas de comprobación de la suficiencia de un bobinado nuevo en**

**fabrica o en su instalación.** – Estas pruebas están destinadas a determinar que un bobinado que es construido y hasta su entrega final al usuario, está físicamente sano y permiten con cierto grado de seguridad, garantizar que tendrá la expectativa de vida prevista, bajo las condiciones de explotación, control, protección, supervisión y mantenimiento establecidas y no cubren las condiciones que salen fuera del ámbito

del alcance de lo especificado en las normas de prueba. -La magnitud, frecuencia, forma de onda y duración de la tensión de prueba están dados en la norma ANSI C50.10-1977, en la NEMA MG1-1978 entre otras, y debe ser aplicado a cada circuito eléctrico, con los demás circuitos conectados firmemente a masa y tierra. – Se usan tres métodos para la aplicación de alto potencial [51], [52]:

- Pruebas con alta tensión a frecuencia industrial. – La magnitud de la tensión que se aplica es según la columna 4 de la tabla 1.5.
- Pruebas de suficiencia con alta tensión con corriente continua [21], [29], [51]. Se aplica una tensión igual a 1.7 veces el valor eficaz de la tensión de prueba especificada para la prueba a frecuencia industrial durante un minuto.
- Pruebas con alto potencial a muy bajas frecuencias [48], [51]. – Se aplica al bobinado en prueba, un potencial alterno de muy baja frecuencia ( en el rango de 0.1 Hz) con un valor de cresta de 1.63 veces el valor rms de la tensión de prueba especificada para el test a frecuencia industrial. –Este tipo de prueba, es ventajosa para la prueba de grandes máquinas con una capacidad del bobinado grande, con lo que el equipo de prueba resulta pequeño.- Este tipo de prueba toma las ventajas de los tests con corriente continua y alterna a la vez.
- Pruebas del aislamiento entre espiras. – Estas pruebas dan una indicación de que el aislamiento entre espiras efectuado tiene la capacidad suficiente para resistir las sobretensiones normales provenientes de la caída de rayos y de los equipos de maniobra, limitados a ambientes con condiciones normales cuyos niveles están especificados en las normas [22}, [23], [28]

Los tests de suficiencia están dirigidos a encontrar los puntos débiles en el material o defectos de manufactura, y para demostrar de una forma práctica que el aislamiento probado, tiene una cierta concordancia con el sostenimiento eléctrico. - Un requerimiento principal de tales pruebas es que deben ser efectivas para la detección de puntos débiles, a / o por debajo de un sostenimiento mínimo especificado sin dañar el aislamiento sano. -Las tensiones de prueba están establecidas para ser suficientemente altas para romper el aislamiento de las bobinas que tienen un factor de seguridad insuficiente con respecto a las tensiones de operación, a las sobretensiones y al deterioro posterior a ser experimentado en servicio.

Debe reconocerse que los tests de suficiencia, a tensión de frecuencia industrial y con tensión directa, son empíricos en su naturaleza y no necesariamente prueban si el diseño del sistema de aislamiento, o el nivel inherente de tensión de rotura del aislamiento es adecuado.

**7.4. -Tests de mantenimiento [26], [27].** –Los tests que se listan a continuación han sido establecidos y usados generalmente para observar la tendencia de la vida útil de las partes de la estructura del aislamiento, y también para detectar tipos específicos de defectos que pueden desarrollarse en algunas porciones del aislamiento - Su uso debe estar basado en la necesidad de la información que dichos tests proveen.

Cuando han sido efectuados sucesivos tests de mantenimiento, las tendencias medidas sobre un periodo de años, son normalmente más importantes que los valores

absolutos medidos, en una inspección específica. -Debe notarse que todos los tests no son aplicables a todas las máquinas. –Algunos tests eléctricos pueden ser potencialmente destructivos del aislamiento.

Los tests de evaluación pueden ser divididos en las siguientes dos categorías:

- Tests para discernir respecto de la existencia de zonas débiles o fallas.
- Tests que dan alguna indicación respecto a la confiabilidad de la expectativa de servicio.

**7.4.1. -Pruebas para dar una indicación de la debilidad del aislamiento.** – Se consideran la aplicación de las siguientes pruebas:

- La medición de la resistencia del aislamiento
- Las pruebas de absorción dieléctrica.
- La pruebas de tensión aplicada de mantenimiento, con AC a frecuencia industrial, DC, o AC a baja frecuencia
- Pruebas del aislamiento entre espiras.

**7.4.2. -Pruebas para dar una indicación respecto a la confiabilidad de la expectativa de servicio.** – Se consideran la aplicación de las siguientes pruebas:

- La medición del factor de potencia del aislamiento
- Las pruebas con alto potencial controlado

En el caso de las pruebas de mantenimiento, la selección de los tests dependerá de la filosofía del usuario, registros de funcionamiento, producción y economía.

Desde que el sostenimiento eléctrico inherente de un aislamiento sano, es bien por encima del valor usual del test de suficiencia, los tests de suficiencia efectuados con una tensión adecuada, causan la falla sólo de aquel aislamiento no apropiado para el servicio.

## **7.5. -Pruebas para indicar la existencia de debilidad del aislamiento.**

**7.5.1. -Resistencia de aislamiento a baja tensión.** – La norma IEEE Std. 43-2000, Práctica recomendada para la medición de la resistencia de aislamiento, describe los conceptos para la realización de la prueba de la resistencia de aislamiento de las máquinas rotativas y las correcciones a ser hechas por los efectos de la temperatura y por las condiciones de humedad, y los valores para la resistencia de aislamiento mínima para la operación segura según el tipo de bobinado y su antigüedad. -Los tests de resistencia del aislamiento están basados en la determinación de la corriente a través del aislamiento, y a través de la superficie cuando es aplicada una tensión directa. -La corriente es dependiente de la tensión, tiempo de aplicación, área, espesor del aislamiento, temperatura y condiciones de humedad durante y en el momento del test. -Estos tests son usualmente efectuados en todos los componentes de los circuitos de un bobinado de armadura o de campo contra tierra. – Primariamente indican el grado de contaminación de las superficies aislantes o del aislamiento sólido, por la humedad y por otras influencias conductoras y no revelará usualmente las roturas incompletas o las no contaminadas.

**7.5.2. -Prueba de absorción dieléctrica.** –Las normas IEEE Std. 43 –2000 para la medición de la resistencia de aislamiento, y la IEEE Std. 95, Práctica recomendada

para las pruebas de aislamiento ( con mas de 5000 Voltios) de grandes máquinas eléctricas rotativas AC, con alta tensión DC, describen las prácticas recomendadas para la obtención de los datos de la absorción dieléctrica.

La prueba de la absorción dieléctrica, implica la determinación de la resistencia de aislamiento como una función del tiempo. -Durante este test, el potencial aplicado es mantenido constante o por el periodo de 10 minutos. -La relación de los valores de la resistencia de aislamiento, a los 10 minutos y a 1 minuto es llamada el “Índice de polarización” o IP y proporciona información acerca de la condición relativa del aislamiento con respecto de los contaminantes y de la humedad.

**7.5.3. -Pruebas con alto potencial [21], [28], [48].** -Los tests con alto potencial también conocidos como “Hi-pot tests”, o de alta tensión aplicada, son usados para tener cierto grado de seguridad respecto del sostenimiento mínimo del aislamiento. – Tales tests son efectuados en todo o en parte del aislamiento de los bobinados contra tierra, durante el proceso de fabricación, en el proceso de aceptación de una maquina construida o reparada, y durante el mantenimiento.

Muchos usuarios de grandes máquinas rotativas aplican los tests de alto potencial periódicamente, generalmente al comienzo del mantenimiento del equipo relacionado. - Esto permite la detección y la posible reparación de las zonas débiles del aislamiento, durante la parada prevista. - Las pruebas de alto potencial pueden ser efectuadas con tensión alterna o con tensión continua y en casos especiales de máquinas mayores, a muy baja frecuencia [48].

El nivel de la tensión que debe ser aplicado, dependerá grandemente del tipo y antigüedad del aislamiento de la máquina en cuestión, del grado de exposición a las sobretensiones, y del nivel de mantenimiento requerido. –Tales pruebas, sin embargo, deben de ser lo suficientemente intensas como para observar o denunciar, cualquier debilidad incipiente en la estructura del aislamiento, que pueda conducir a fallas en servicio.

Las pruebas de mantenimiento con alto potencial, pueden ser alternativamente efectuadas mediante métodos que utilicen corriente alterna o continua. -Los valores de las tensiones de prueba, usualmente son seleccionados como sigue:

- Para los tests a 60 Hz, la tensión de prueba de mantenimiento, se selecciona en el rango de 125 al 150 % de la tensión nominal entre líneas y es mantenida por un minuto. -Los equipamientos para efectuar las pruebas con alto potencial a muy bajas frecuencias (0.1Hz), ya son comercialmente disponibles en el mundo desarrollado. – Tales equipos son usualmente de menor costo, peso y tamaño que los equipos equivalentes para 60 Hz.
- Para los tests con DC, el nivel recomendado de la tensión de prueba es de 125 a 150% de la tensión nominal entre líneas multiplicado por 1.7

**7.5.4. -Pruebas del aislamiento entre espiras [22], [23], [26], [28].** –En los casos en los que la integridad del aislamiento entre espiras de las bobinas sea objeto de observación, deben efectuarse las pruebas para establecer que existe un determinado nivel de sostenimiento dieléctrico entre vueltas. – El equipo de pruebas empleado en

la aplicación del aislamiento entre espiras, es usualmente del tipo donde un capacitor es alternativamente cargado y luego descargado en la bobina bajo prueba, o en una bobina inductora, que ha sido previamente ubicada en el entrehierro del estator sobre la bobina en prueba.

El aislamiento entre vueltas de las bobinas del estator basado en film-mica-compound que provee usualmente un alto sostenimiento dieléctrico y es comúnmente usado en las máquinas de alta tensión. - En muchos casos, el aislamiento entre vueltas es de naturaleza fibrosa, y las fibras, como las del vidrio por ejemplo, microscópicamente no son fáciles de impregnar. - El aislamiento fibroso provee una separación física efectiva entre las vueltas, del orden de 0.25 a 0.635 mm y en estos casos el sostenimiento dieléctrico entre las vueltas es esencialmente dado por el valor aislante del gas (aire, hidrógeno, etc) contenido entre estas fibras [26], [38], [39] (referirse a la ley de Paschen), por lo que el nivel de tensión de prueba seleccionado debe ser mayor que el potencial de descarga mínimo del aire (350 voltios) en los espacios entre vueltas mínimos permisibles (ver la Fig. 1.1)

**7.5.5. -Pruebas de descargas parciales [26], [27].** -Las pruebas de descargas en las ranuras son efectuadas con el solo propósito de chequear el adecuado contacto eléctrico entre las superficies conductoras de las bobinas y las ranuras del núcleo del estator. - La pérdida de este contacto eléctrico, resulta en una energía de descarga relativamente alta entre la superficie conductora de la bobina y el núcleo. - Al producirse un acelerado deterioro del aislamiento por efecto de las descargas parciales, es importante una detección y corrección temprana de esta condición.



Los analizadores de las descargas parciales, utilizan circuitos resonantes de detección, en el rango de frecuencias donde la energía de la superficie que descarga es alta (aproximadamente 2500 Hz), mientras que bloquea el paso de la tensión de 60 Hz por medio de un filtro pasa alto.

Los tests son efectuados con el bobinado energizado a aproximadamente el esfuerzo normal contra tierra. - La detección es llevada a cabo mediante un analizador de descargas parciales conectado a los terminales de la máquina en prueba, una fase por vez. -Cuando existe una descarga, las reflexiones de alta frecuencia son fácilmente observables en un osciloscopio de rayos catódicos conectado a la salida del detector de descargas parciales. – La localización de las bobinas que sufren de descargas parciales es efectuada mediante una sonda manual de detección. – La prueba de detección utiliza el analizador de descargas junto con una sonda manual de detección (ver también ASTM Std. D3382)

Actualmente están en proceso de difusión el análisis de la condición del aislamiento mediante pruebas de detección de DPs. on-line y off- line

**7.6. – pruebas para dar una indicación de la confiabilidad del estado del aislamiento.** – Se considera la aplicación de las pruebas del factor de potencia del aislamiento y de una prueba de tensión aplicada graduada con DC.

**7.6.1. -Prueba de la tangente del ángulo de pérdidas, o tests del factor de potencia [36]** – La norma, IEEE Std. 286-1975 Práctica recomendada para la

medición del incremento del factor de potencia del aislamiento (tip-up) de las bobinas de los estatores de las máquinas eléctricas se refiere a esta materia.

La medición del factor de potencia provee información muy útil para la evaluación de la estructura del aislamiento en forma promediada, de los bobinados de las máquinas de alta tensión. -El valor y significado de estos tests, es grandemente dependiente del tamaño y condición o situación de la muestra en prueba. -Los valores del factor de potencia medidos en un bobinado completo, son valores medios de aquellos valores medidos que se obtendrían de los componentes individuales de tal bobinado.- Por ello, las debilidades o el deterioro en un componente, puede ser encubierto en el promedio del factor de disipación medido en el ensamble completo.

La norma UNE 20894 IN Guía para un procedimiento de ensayo para la medición de la tangente del ángulo de pérdidas de las bobinas y barras para devanados de máquinas de la Asociación Española de Normalización y Certificación, entre otras, está dirigida al control de calidad de las bobinas individuales de más de 6 kV en el proceso de fabricación, donde sí tiene mayor significado esta medición.

**7.6.2. -Pruebas con alto potencial DC controlado [21].** -Un test de alto potencial controlado con corriente continua, con más de 5000 voltios, es uno en el cual el incremento de la tensión DC es controlado, y las corrientes medidas son continuamente observadas con el objeto de detectar un comportamiento anormal, con la intención de detener el test antes de que ocurra una falla. – Este test es a menudo referido como “test de corriente de fuga directa” . -Muchos operadores de grandes

máquinas, han encontrado que este test es una herramienta muy útil, aunque hay alguna controversia en la interpretación de los resultados de los tests, y algunas veces ocurren fallas sin una indicación previa.

#### **7.7. – Resumen de la Norma para la medición de la resistencia de aislamiento**

**IEEE 43-2000.** -La medición de la resistencia de Aislamiento es y ha sido recomendada y usada por más de media centuria para el monitoreo de la condición del aislamiento eléctrico de las máquinas eléctricas rotativas.. – Mientras que las simples mediciones individuales de la resistencia de aislamiento pueden ser de un valor cuestionable, el mantenimiento de registros de mediciones periódicas cuidadosamente efectuadas, acumuladas en meses y años de servicio, vista como la medida de algunos aspectos de la condición del aislamiento eléctrico, es de incuestionable valor. – Durante los años 70, se hicieron muchos cambios en los tipos de aislamiento eléctrico utilizados en las máquinas eléctricas rotativas y las características de estos nuevos tipos de aislamiento son diferentes de aquellos utilizados antiguamente; por lo tanto requirieron una revisión del Standard en su versión del año 1974, ameritando una descripción adicional de la teoría de las pruebas y la remoción del anexo referente a los procedimientos de secado para los bobinados antiguos. – Actualmente esta norma, describe la teoría, procedimientos, e interpretación de los tests de la medición de la resistencia del aislamiento y está dirigido a quienes manufacturan, aceptan, prueban, operan o mantienen máquinas eléctricas rotativas. -La medición de la resistencia de aislamiento de las máquinas eléctricas rotativas esta destinada a evaluar la condición del aislamiento eléctrico, para determinar si el aislamiento esta listo para retornar al servicio o para una prueba

con alto potencial y busca promover la consistencia de los procedimientos en la prueba del aislamiento y de su interpretación, proporcionando información útil acerca de la teoría y aplicación de este test.

La Norma se aplica para la medición de la resistencia de aislamiento de los bobinados de las máquinas rotativas de más de 1 hp; no es aplicable a las máquinas de potencia fraccionaria y describe las características típicas de la resistencia de aislamiento de las máquinas rotativas y cómo estas características, indican la condición del aislamiento de un bobinado.

**7.7.1. – Terminología adecuada ex profeso por esta norma.** – Los siguientes términos han sido adaptados para el uso de esta norma.

- **Corriente de Absorción ( de polarización).** – Es una corriente que resulta de la polarización molecular y del arrastre de electrones, la cual decae con el tiempo de aplicación de la tensión a una tasa decreciente, desde un valor inicial comparativamente alto, hasta cero, y depende del tipo y condición del agente aglomerante.
- **Corriente de conducción ( $I_G$ ).** – Es una corriente que es constante en el tiempo (mientras se aplique la tensión constante de prueba), la cual pasa a través del cuerpo sólido del aislamiento, desde la superficie puesta a tierra (positivo), hasta el conductor a alta tensión (negativo), y depende del tipo de material aglomerante utilizado en el sistema de aislamiento en prueba.
- **Efecto de electro endósmosis.** – Es un fenómeno observado ocasionalmente, más a menudo en bobinados viejos, cuando en la presencia de la humedad

pueden obtenerse diferentes valores de la resistencia de aislamiento, cuando se invierte la polaridad de los conductores de prueba. – Típicamente para bobinados viejos y húmedos, la resistencia de aislamiento para la polaridad reversa -cuando el cable que va a tierra (el positivo) es conectado al bobinado, y el conductor con tensión negativa a tierra - es más grande que para la polaridad normal.

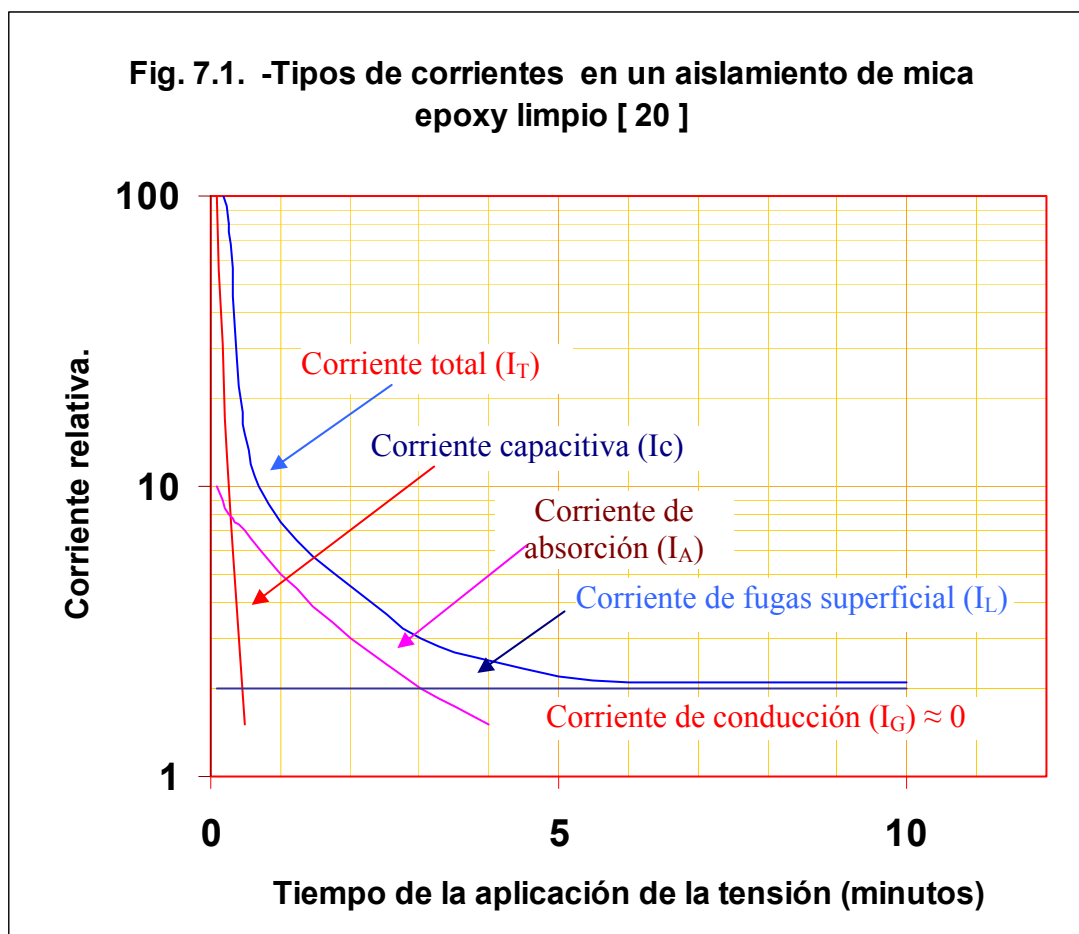
- **Resistencia del aislamiento ( $RA_t$ ).** –Es la cualidad del aislamiento eléctrico de un bobinado para resistir la aplicación de la tensión directa. – Es el cociente de un voltaje directo aplicado, de polaridad negativa, dividido entre la corriente a través del aislamiento de una máquina, corregido a 40°C y tomado en un tiempo (t) especificado desde el inicio de la aplicación de la tensión. – El Tiempo de la aplicación de la tensión es usualmente de 1 min. ( $RA_1$ ) o de 10 min. ( $RA_{10}$ ), Sin embargo, pueden ser utilizados otros intervalos de tiempo. -Convencionalmente la indicación de los valores de tiempo de 1 a 10 se asume en minutos y de 15 o más se asume que están dados en segundos.
- **Corriente capacitiva geométrica ( $I_c$ ).** –Es una corriente reversible de una magnitud comparativamente alta y de corta duración, que decae exponencialmente con el tiempo de aplicación de la tensión. – Esta corriente depende de la resistencia interna del instrumento de medición y de la capacitancia geométrica del bobinado relacionada directamente con el área y el espesor del dieléctrico.
- **Índice de polarización ( $IP_{t_2 / t_1}$ )** –Es el cociente de la resistencia de aislamiento tomada en un tiempo  $t_2$ , dividido entre el valor de la resistencia

de aislamiento tomada en el tiempo  $t_1$ . – Si no se especifica los tiempos  $t_2$  y  $t_1$ , se asume que se refieren a 10 min y a 1 min respectivamente; por ejemplo  $IP_{60/15}$  se refiere a  $RA_{60s}/RA_{15s}$

- **Corriente de fuga superficial.** –Es una corriente que es constante con el tiempo, y que usualmente existe sobre la superficie de las cabezas de bobina de los estatores o entre los conductores expuestos (conmutador o colector) y el núcleo del rotor, en los bobinados aislados de los rotores. -La magnitud de la corriente de fugas superficial es dependiente de la temperatura y de la cantidad de material conductor, de la humedad o de la contaminación de la superficie exterior del aislamiento.

**7.7.2. -Teoría general de la resistencia del aislamiento.** –La resistencia del aislamiento de una máquina eléctrica rotativa es una función del tipo y de la condición de los materiales aislantes usados, tanto como de la técnica de la aplicación utilizada. – En general, ésta varía proporcionalmente con el espesor del aislamiento, e inversamente con la superficie del conductor. – Por definición, esta resistencia es el cociente de la tensión directa aplicada al aislamiento, dividida entre la corriente resultante en un tiempo dado. – La corriente resultante total esta compuesta por la suma de cuatro corrientes diferentes a saber (Fig. 7.1):

- **La corriente capacitiva geométrica ( $I_c$ ).** – Usualmente esta corriente no afecta las mediciones, debido a que desaparece rápidamente antes de que sea tomada la primera lectura.
- **La corriente de absorción o de polarización ( $I_p$ ).** - la cual decae con una



taza decreciente y depende del tipo de aislamiento.- Esta corriente tiene dos componentes. – La primera es debida a la polarización del agente de impregnación debido al cambio de orientación de las moléculas de estos materiales en presencia del campo eléctrico. – Este proceso toma varios minutos debido al efecto de atracción que se produce lentamente entre unas moléculas con otras, por lo cual toma un tiempo hasta que la energía de polarización que absorbe el material se reduzca a casi cero. – El segundo componente es debido al arrastre de los electrones libres en el cuerpo del material aislante hasta que éstos queden atrapados en las superficies de las láminas de mica. – La resistencia de aislamiento de un bobinado limpio y

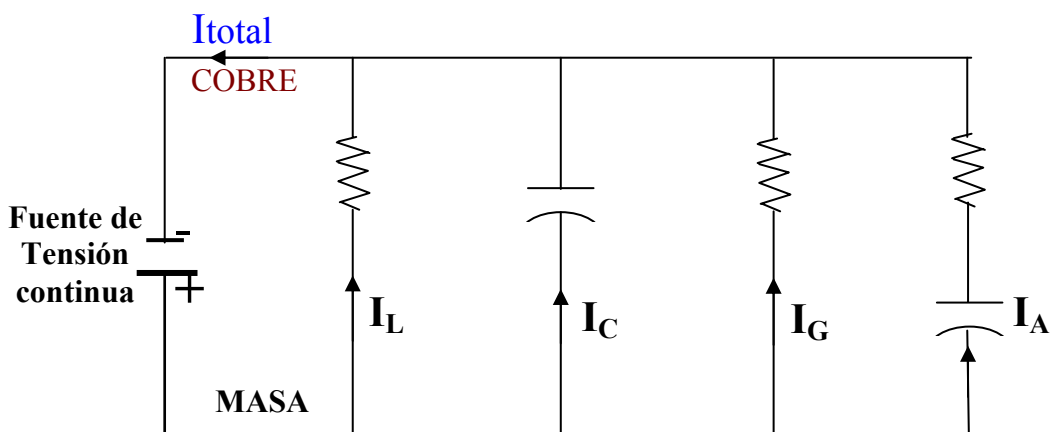
seco es determinada principalmente por la corriente de absorción entre los 30 segundos y unos pocos minutos de la aplicación de tensión

- **La corriente de conducción ( $I_G$ ).** –La corriente de conducción en los sistemas de aislamiento del tipo epoxy o de poliéster bien impregnados, es prácticamente cero, a menos que el aislamiento esté saturado de humedad.
- **La corriente de pérdidas superficial ( $I_L$ ).** –Esta corriente es constante en el tiempo. – Una alta corriente de pérdidas superficiales, y con ello una resistencia de aislamiento baja, es usualmente ocasionada por la humedad o por algún tipo de contaminación parcialmente conductiva.

**7.7.3. -Características de la corriente directa medida.** – Observando el cambio de la corriente total o de la resistencia de aislamiento con la duración de la tensión de prueba aplicada puede apreciarse si un aislamiento está seco y limpio. – Si un bobinado está húmedo o contaminado, la corriente total se mantendrá aproximadamente constante en el tiempo ya que las corrientes  $I_L$  y/o  $I_G$  serán mucho más grandes que la corriente de absorción  $I_A$ . – Si los bobinados están limpios y secos, la corriente total ( $I_T$ ) normalmente decrecerá con el tiempo.

La Medición de la resistencia de aislamiento, constituye un test de tensión directa aplicada por lo que la tensión de prueba, debe estar restringida a un valor apropiado; esto es particularmente importante en el caso de pequeñas máquinas de baja tensión, o en máquinas húmedas. – Si la tensión de prueba es muy alta, la tensión de prueba puede sobre esforzar el aislamiento, conduciendo a su falla. -Los tests de medición de la resistencia de aislamiento, son usualmente realizados con





**Fig. 7.2. –Circuito equivalente durante un test de medición de la resistencia de aislamiento**

tensiones de entre 500 a 10,000 voltios aplicándose la polaridad negativa al cobre del bobinado. – La polaridad negativa, es preferida debido al fenómeno de la electro endósmosis. La tabla siguiente es orientativa para las tensiones de prueba de la resistencia de aislamiento. –Las lecturas de la resistencia de aislamiento se toman al cabo de un minuto de aplicación de la tensión de prueba.

<b>Tensión nominal del bobinado (voltios)</b>	<b>Tensión directa de prueba de la resistencia de aislamiento (voltios)</b>
<1,000	500
1,000 – 2,500	500 – 1,000
2,501 – 5,000	1,000 – 2,500
5,001 – 12,000	2,500 – 5,000
> 12,000	5,000 – 10,000

**Tabla No. 7.2 - Tensiones D.C de prueba a ser aplicadas durante la medición de la resistencia de aislamiento.**

**7.7.4. -El Índice de polarización.** –Normalmente esta definido como la relación  $RA_{10}/RA_1$  pero actualmente también se aplican otros valores.

**7.7.5. -Corriente de descarga.** – Después de efectuar una medición de la resistencia de aislamiento debe ponerse a masa los terminales del bobinado por lo menos un tiempo de 4 veces el tiempo que se efectuó la carga del bobinado. –El no hacerlo es muy peligroso para las personas y los instrumentos.

**7.7.6. -Factores que afectan a la resistencia de aislamiento.** –La resistencia del aislamiento de un bobinado es afectada por la temperatura y por la condición de su estado, es decir, húmedo o contaminado, viejo o reseco. – La medición de la resistencia del aislamiento es afectada por el nivel e inestabilidad de la tensión aplicada, por la carga preexistente y por las variaciones de la temperatura durante la prueba. -El valor de la resistencia de aislamiento, varia exponencialmente con la temperatura del bobinado. -La variación de la temperatura afecta todas las corrientes en el aislamiento excepto la corriente capacitiva geométrica. -Cuando se efectúen mediciones en un bobinado que está cambiando su temperatura, es recomendable referir la resistencia de aislamiento a una misma base de temperatura que es generalmente de 40°C, mediante un adecuado factor de corrección. – Este factor de corrección puede ser tomado en la forma siguiente.

$$R_c = K_T \cdot R_T \quad \text{Ec. 7.1}$$

Donde:

$R_c$  : es la resistencia de aislamiento corregida a 40°C

$K_T$  : es el coeficiente de temperatura de la R.A a la temperatura de T °C

$R_T$  : es la resistencia de aislamiento medida a la temperatura de  $T$  °C

**7.7.7. -El coeficiente de corrección de la resistencia de aislamiento en función de la temperatura de medición.** – El método recomendado para obtener los datos para una curva de la resistencia de aislamiento versus la temperatura, es efectuando mediciones de la resistencia de aislamiento a diferentes temperaturas del bobinado, todas por encima del punto de rocío, y ploteando los resultados en una escala semilogarítmica. -En la versión anterior de esta norma (del año 1974) se planteaba para el coeficiente  $K_T$  de manera general que la resistencia de aislamiento se dividía en dos por cada 10°C de incremento de la temperatura. – Esta aproximación ha devenido en insuficiente dadas las nuevas características de los bobinados impregnados con resinas de poliéster y epóxicas.

**7.7.8. -Efecto de la magnitud de la tensión.** – El valor de la resistencia de aislamiento puede decrecer un tanto con el incremento de la tensión de prueba; sin embargo, para un aislamiento en buenas condiciones, y en un estado completamente seco, se obtendrá sustancialmente la misma resistencia de aislamiento para cualquier voltaje de prueba hasta como máximo el valor pico de la tensión nominal [21]

**7.7.9. -Interpretación de la resistencia de aislamiento y del índice de polarización.** –La resistencia de aislamiento y el índice de polarización se utilizan para dos propósitos:

- Como una herramienta para el establecimiento de algunos aspectos de la condición del aislamiento con el paso de los años.

- Para determinar si el aislamiento del bobinado de una máquina está en condiciones para efectuársele un test con alto potencial, o para ser operada, basado en la tendencia histórica de los valores del IP o de la RA.

Si se requiere poner en servicio o efectuar una prueba de alto potencial, las máquinas de menos de 10000 Kva. Deberán tener, o el valor de la RA a 40°C, o el IP, por encima del mínimo recomendado y las máquinas por encima de los 10,000 Kva., deberán tener ambos valores por encima del mínimo recomendado.

Pero si el valor de la Resistencia de aislamiento corregida a 40°C es mayor que los 5,000 MΩ, el índice de polarización puede ser ambiguo y puede no ser tomado en cuenta.

**7.7.10. - Valores mínimos recomendados para la Resistencia de Aislamiento y del índice de polarización.** –Son aquellos necesarios para que una máquina pueda ser puesta en operación o para que sea sometida a un test de alto potencial.

**7.7.11. -Valor mínimo del índice de polarización.** –Los valores mínimos recomendados están basados en la clase térmica del aislamiento. (Según la teoría de la Baker ®, para las potencias menores de 150 HP, no se evalúa el IP pues da valores incongruentes).

**7.7.12. -Valor Mínimo de la resistencia de aislamiento.** – El valor mínimo de la resistencia de aislamiento, después de 1 min ( $RA_{1min}$ ) corregida a la temperatura de 40°C, puede ser determinado de la tabla 7.4 siguiente:

<b>Clase Térmica</b>	<b>Índice de Polarización</b>
Clase A	1.5
Clase B	2.0
Clase F	2.0
Clase H	2.0

**Tabla 7.3. –Valores mínimos recomendados para el índice de polarización**

<b>Resistencia de aislamiento Mínima. (MΩ)</b>	<b>Espécimen en prueba.</b>
<b>RA<sub>1 min</sub> = kV+1</b>	Para la mayoría de los bobinados fabricados antes del año 1970 aproximadamente, y para todos los bobinados de campo no descritos abajo.
<b>RA<sub>1 min</sub> =100</b>	Para la mayoría de bobinados con bobinas preformadas de las Armaduras y bobinados de CA, construidos aproximadamente después del año 1970
<b>RA<sub>1 min</sub> =5</b>	Para la mayoría de los bobinados de menos de 1 kV de tensión nominal, con bobinas preformadas y tipo random ( Con alambre, bobinados a mano o a máquina)
<b>RA<sub>1 min</sub></b> = Es el valor mínimo recomendado en MΩ a 40°C, para la resistencia de aislamiento de un bobinado completo. <b>kV</b> = Es la tensión nominal de la máquina en prueba, en kV rms.	

**Tabla 7.4. –Valor mínimo recomendado de la resistencia de aislamiento corregida a 40°C ( Todos los valores en MΩ)**

**7.8. – Conceptos de la Norma de Pruebas con Alto Potencial con Corriente Continua: IEEE Std. 95.** -Esta norma presenta los métodos para la uniformización de las pruebas de aislamiento con tensiones directas mayores que 5000 voltios. – Es

aplicable a grandes máquinas de 10,000 KVA o mayores, con tensiones de trabajo de 6,000 voltios o más, aunque estos métodos, han sido encontrados aplicables a equipos de menor tamaño y tensión. – Cubre las pruebas de aceptación de equipamiento nuevo en fábrica o en el campo después de su erección, y de las pruebas de mantenimiento de rutina para las máquinas que han estado en servicio. – Las siguientes definiciones se han tomado de esta norma:

- **Prueba de suficiencia de mantenimiento.** –Es un test aplicado a la armadura de un bobinado, después de haber estado en servicio, para determinar si es capaz de seguir estando en servicio en forma continua. – Usualmente es efectuado a un nivel de tensión menor que las pruebas de suficiencia de aceptación.
- **Un alto potencial directo de prueba.** -Es una tensión por encima del valor pico de la tensión alterna de línea.
- **Prueba de suficiencia (prueba de sostenimiento).** -Es una prueba que se efectúa a un sistema de aislamiento, cuyo resultado es falla o no falla, o también pasa o no pasa, que se realiza al bobinado de una máquina para demostrar que el sostenimiento eléctrico de su aislamiento está por encima de un determinado valor.

**7.8.1. -Descarga del bobinado.** – A continuación de un test con alta tensión directa, el bobinado debe ser puesto a tierra por un lapso mínimo igual o mayor que 4 veces el tiempo acumulado de prueba, pero en ningún caso menor de 1 hora, para asegurar que no permanezca almacenada carga significativa en el bobinado.

La disipación de la carga absorbida, no puede ser acelerada mediante la aplicación

*de un potencial alterno*, o mediante la aplicación de una tensión con la polaridad reversa. Si esto es realizado, se puede perforar el aislamiento.

**7.8.2. -Tensión de prueba para las pruebas de suficiencia de mantenimiento. –**

Para los equipos que han estado en servicio, la tensión de prueba varia dependiendo del tipo, condición del aislamiento, historia del equipo, confiabilidad de servicio deseada, etc. En general una tensión de prueba a frecuencia industrial que esté entre el 125 y el 150 % de la tensión nominal, ha demostrado ser adecuada. -La tensión de prueba DC para los tests de mantenimiento, es calculada multiplicando la tensión rms de prueba de mantenimiento a frecuencia industrial por 1.7

**7.8.3. -Duración de los tests de aceptación o de mantenimiento.** -La aplicación de la tensión de prueba debe ser gradual, y una vez alcanzado el valor especificado para la prueba, deberá mantenerse por el lapso de un minuto. -Al final del test la reducción de la tensión de prueba no deberá ser abrupta, ésta debe ser disminuida hasta por lo menos la mitad del valor de prueba, antes de que el bobinado sea puesto a masa inicialmente por medio de una resistencia y luego sólidamente, por un lapso mínimo de una hora o de 4 veces el tiempo de prueba.

**7.8.4. -Resultados de la prueba.** -Las pruebas de suficiencia de aceptación o de mantenimiento, son efectuadas sobre una base de sostenimiento simplemente.

Si no hay evidencia de debilidad o de falla, al final de la aplicación total del test, la prueba se toma como satisfactoria.

**7.8.5. -Falla.** –La falla completa del bobinado, es usualmente indicada por una brusca descarga capacitiva en el punto de falla.. – Hay, sin embargo, casos donde la falla o falla parcial es indicada por un cambio anormalmente grande de la corriente de fugas o por un comportamiento errático de la corriente de conducción observada en el instrumento.

**7.8.6. -Prueba con alto potencial DC controlado.** -Debe notarse que existe alguna controversia en la interpretación de los resultados de esta prueba de alto potencial. Muchos operadores han encontrado que esta prueba es una herramienta de mantenimiento muy útil, mientras que otros cuestionan su valor.- Uno de varios métodos para efectuar esta prueba se describe a continuación.

**7.8.7. -Método de prueba con alto potencial DC controlado.** –Esta prueba es un test con alta tensión DC, en la cual la tensión es incrementada de una forma especificada, y durante el tiempo de aplicación la corriente medida es observada.

Este tipo de pruebas, efectuada bajo condiciones apropiadas, provee un registro de la condición del bobinado, para uso presente y futuro, y puede permitir la predicción, de si la tensión de ruptura está dentro o ligeramente por encima de la tensión de prueba. – Pueden efectuarse conclusiones mediante el reconocimiento de las anomalías o desviaciones en la curva determinada por la corriente versus la tensión aplicada. -A menudo es posible, pero no siempre, terminar el test antes de que se presente la falla o antes de que el aislamiento quede defectuoso, pero deben tomarse las provisiones necesarias en caso que se produzca la falla del aislamiento.



**7.8.8. –Interpretación del test con alto potencial controlado, con corriente continua.** -La rotura del aislamiento, no puede siempre ser predicha de la curva, por lo tanto pueden ocurrir fallos impredecibles. – Cuando este método es aplicado con éxito, puede interpretarse lo siguiente:

- Para un bobinado sano, el ploteo de la corriente medida Vs. la tensión aplicada, produce una curva suave con una característica ascendente y el test puede ser continuado hasta alcanzar la tensión máxima recomendada
- Cualquier desviación de la curva suave, indica la aproximación a la tensión de rotura del aislamiento. – El aviso de la inminente descarga, es a veces obtenido dentro de un límite reducido como del 5 % debajo de la tensión de rotura. – El test debe ser detenido, si se desea evitar la descarga.
- El indicativo más frecuente de la aproximación de la falla del aislamiento es una aceleración en la tasa de incremento de la corriente con la tensión.
- Si es observada una abrupta caída en la corriente de fuga por encima de la tensión pico de operación, puede indicar que se aproxima la falla.
- El test es usualmente efectuado en forma individual en cada fase del bobinado. - Las diferencias son usualmente atribuidas a la condición del aislamiento.

**7.8.9. -Pruebas de aceptación usando Alta tensión directa.** –Existe una gran experiencia de pruebas en un periodo de muchos años que han sido obtenidos por los fabricantes, algunos de los cuales han efectuado uso extensivo de la alta tensión DC durante e inmediatamente al proceso de manufactura, del equipo, siendo la mayoría de éstos, practicados como tests de suficiencia.

- Raramente es observada una abrupta caída en la corriente de fuga; pero cuando aquello ocurre, por encima de la tensión pico de operación del bobinado, puede indicar que se aproxima la falla del aislamiento. Ningún método se conoce para estimar la tensión de rotura en este caso y puede asumirse solo, que la falla es inminente, ante lo cual, el test debe ser detenido, si debe evitarse la posible falla del aislamiento.
- Pueden ocurrir casos de rotura abrupta del aislamiento, antes de que la corriente de fugas se aproxime a la vertical. – En algunos casos esto ocurre cuando hay abrasión mecánica, fisuras o migración aguda de la mica. De aquí, si la falla del aislamiento tiene que ser evitada, el test deberá ser terminado, en forma conservadora, cuando la inspección preliminar ha mostrado que tales condiciones posiblemente existen.
- El test es usualmente efectuado en forma individual en cada fase del bobinado. Las diferencias en las curvas características de las fases no atribuibles al efecto corona, temperatura, o humedad, son usualmente atribuidas a la condición del aislamiento.

**7.8.9. -Pruebas de aceptación usando Alta tensión directa.** –Existe una gran experiencia de pruebas en un periodo de muchos años que han sido obtenidos por los fabricantes, algunos de los cuales han efectuado uso extensivo de la alta tensión DC durante e inmediatamente al proceso de manufactura del equipo, siendo la mayoría de éstos, practicados como tests de suficiencia.

## CONCLUSIONES

1. -Las bobinas de las máquinas rotativas de A.T. en condiciones de prueba del aislamiento contra masa, se comportan como una línea de conductores concéntricos coaxiales de sección rectangular y los bordes de dicha sección, son sectores en forma de cuadrantes de una línea de conductores cilíndricos coaxiales. -Este concepto, fue aclarado [14] durante el desarrollo de las bobinas para las máquinas de 21 kV y más, debido a que en esos nuevos niveles de tensión las bobinas presentaban poca duración.
  
2. –En un sistema de aislamiento, la configuración de los electrodos determina los niveles de campo eléctrico en el dieléctrico. – De acuerdo con la forma de los electrodos, en el dieléctrico se establecerá un nivel de campo eléctrico máximo, ( $E_{max}$ ) que puede ser relacionado con el nivel de campo eléctrico uniforme ( $E_{unif}$ ) que se establece en un condensador de electrodos planos, que tenga un dieléctrico del mismo espesor y tipo.
  - a. La relación  $E_{max}/E_{unif}$  indica, cuánto más cargado está el aislamiento de la configuración respecto del aislamiento de una configuración de electrodos planos ( fig. 3.25)
  - b. La relación  $E_{unif}/E_{max}$  es el coeficiente de utilización, e indica, en qué medida, el aislamiento es pobremente utilizado, debido a las concentraciones de campo eléctrico ( Fig. 3.26)

3. -De acuerdo con el radio de los bordes del paquete de conductores de las bobinas, quedará definido el nivel del campo eléctrico máximo  $E_{max}$ , en el aislamiento, el que se ubica en los cuatro bordes de la sección de la parte activa, en un espesor de menos del 20% del aislamiento junto a los bordes de los conductores extremos del paquete de conductores (Fig. 3.24). – Este nivel de esfuerzo del campo eléctrico en los bordes de la bobina, puede ser de entre 1.8 a 3 veces el nivel del campo eléctrico uniforme  $E_{unif.}$ . – Este último era el único considerado antiguamente antes del desarrollo de este concepto [2].
  
4. -La relación entre el campo eléctrico máximo de una configuración coaxial y el campo eléctrico uniforme de una configuración de electrodos planos con el mismo espesor de aislamiento (Ec.1.17), en función del radio del cobre y del espesor del aislamiento, y que se ha graficado en la curva 1 de la Fig. 3.25, tiene un valor de entre 1.8 para un radio de bordes del 50 % del espesor del aislamiento, y más de 5 para radios de borde menores del 10% de dicho espesor.
  
5. -La distribución del potencial en el dieléctrico, de la combinación en paralelo de los sectores del aislamiento considerados como el dieléctrico de condensadores de conductores planos paralelos, y los sectores de los bordes, tomados como sectores de  $90^\circ$  de una línea de conductores coaxiales (Figs. 2.3, 2.4 y 2.5), ha sido calculada en este trabajo mediante la solución de la Ec. de Laplace que gobierna dicha distribución de potenciales; aplicando métodos numéricos de relajación, utilizando una combinación de coordenadas cartesianas, cilíndricas (Fig. 3.4 y 3.5), y las relaciones de cálculo adaptadas para la evaluación de los

potenciales en los nodos de la malla de cálculo, establecida para cada sector. – Se ha obtenido una distribución de la relación  $E_{max}/E_{unif}$  dada por la curva 2 de la Fig. 3.25. –Dicha relación, indica niveles de campo eléctrico relativamente menores, para radios de borde de menos de un 30% del espesor del aislamiento, que los establecidos para el caso de la línea de conductores coaxiales cilíndricos [14] dada por la curva 1 de la Fig. 3.25 (gráfica de la Ec. 1.17)

6. -Se ha comprobado el resultado obtenido como la curva 2 de la fig. 3.25 realizando el cálculo de la distribución de los potenciales en la zona de los bordes, efectuando una transformación conforme de dicho cuadrante, y realizando el cálculo de los potenciales, en coordenadas cartesianas. (Figs. 3.14 a 3.18). -Adicionalmente, se ha comprobado el mismo resultado mediante el uso de un juego de programas de aplicación, que utiliza la técnica de los elementos finitos [51], ver la Tabla 3.14 y la curva 3 en las Figs 3.19 a 3.23; obteniéndose la misma distribución de la relación de los gradientes de potencial  $E_{max}/E_{unif}$  en la línea media de la zona de los bordes.
7. -De acuerdo con la curva 1 o con la curva 2 de la Fig. 3.25, para efectos prácticos o de diseño, se observa que no se logra una distribución de la relación de  $E_{max}/E_{unif}$ , de menos de 1.8 para un radio de bordes del 50% que es un límite práctico, dadas las dimensiones usuales del espesor de los conductores de sección rectangular utilizados en las bobinas preformadas; y para radios de borde del cobre de mas del 30 % del espesor del aislamiento, no se obtiene una apreciable mejora de dicha relación.

8. -Debido a que el conductor de cobre de sección rectangular tiene una tolerancia de fabricación amplia de hasta  $\pm 25\%$  del radio de bordes especificado o establecido, según sea el caso, debe considerarse, de ser posible, un radio de bordes de entre el 40 y 50% del espesor del aislamiento con el objeto de garantizar que el radio de bordes mínimo, sea lo más grande posible.
  
9. -Las normas de algunos países, para la especificación del conductor de cobre electrolítico de temple blando, para uso en bobinas preformadas de máquinas eléctricas, consideran un radio de bordes de acuerdo a las dimensiones del conductor, pero los fabricantes del conductor ofrecen la alternativa de que el comprador especifique su requerimiento. – No existe una Norma Nacional para la especificación de la fabricación del cobre de sección rectangular para bobinas de máquinas eléctricas rotativas, y no todos los productores locales de este material manejan bien este aspecto. –La Norma ASTM B 48-00 especifica los radios de los bordes o de las esquinas del conductor y no establece la opción de que el comprador especifique el radio de bordes.
  
10. -El factor de seguridad del aislamiento de las bobinas ( Ec. 3.7), tal como está planteado en las tablas Nos 3.15 a 3.21, puede devenir en insuficiente si se considera que el conductor tiene el mismo tipo de aislamiento, que el aislamiento de pared contra masa de las bobinas. -Normalmente el aislamiento del cobre, para un determinado nivel de tensión, ocupa de un 10 a un 15 % del espesor total del aislamiento, justamente donde en los bordes se da el mayor nivel de esfuerzo de campo eléctrico, como se puede apreciar en la Figs. 3.24 y

en las Tablas 3.13 o 3.14. - Por ello para el cobre, y sobre los conductores en paralelo que formen cada espira, normalmente se dispone de un aislamiento que tenga una rigidez alta (50 kV/mm), con lo que el factor de seguridad para el caso de las máquinas con tensiones usuales ( de hasta 13,8 kV) se incrementa a casi 2 para la condición de la prueba del aislamiento transversal (contra masa) equivalente a la de impulso a 60 Hz. [28]. – Para mayores tensiones, el diseño según el tipo de máquina, puede considerar formas especiales del conductor (conductores tubulares), en la zona de los bordes, en especial en las transposiciones, y el uso de cintas de mica con soporte de vidrio o fieltro de poliéster y con el tamaño adecuado de las escamas de mica [8], [9]

**11.** -El aislamiento de las bobinas de AT, esta constituido por 3 componentes básicos: la mica, que es en sí el dieléctrico encargado de soportar la alta tensión, el material de soporte, que permite dar forma al aislamiento y el aglomerante que une las laminillas de mica con el material de soporte, proporcionando al aislamiento su forma física sólida y compacta, desplazando al aire y con ello sus características adversas.

**12.** -El tipo de material de soporte está restringido según el nivel de tensión. – Para las máquinas de menos de 11 a 14 kV, el film de poliéster es el material de soporte por excelencia, limitado por la temperatura en la mayoría de los casos a 155 °C o a lo mas a 180 °C y por el efecto corona. - El vidrio en forma de tela, es muy resistente a los efectos de la temperatura hasta mas allá de la clase H y no es afectado mayormente por el efecto corona, pero no aporta al incremento de los

caminos de rotura y con ello a la rigidez dieléctrica entre láminas de mica, como lo hace el film de poliéster.

- 13.** -El tipo de material aglomerante (brea, laca, resina sintética) determina grandemente las características térmicas dieléctricas y físicas de un sistema de aislamiento, de él depende el ángulo de pérdidas ( $\cos\phi$  o  $\tan\delta$ ), las características de la permitividad media en función de la temperatura, la temperatura umbral, sus características frente al ambiente, humedad, resistencia al efecto corona y el tiempo de vida previsto por los fabricantes de los materiales aislantes (25000 a 35000 horas)
- 14.** -Debido a que los materiales aislantes de naturaleza fibrosa proveen una separación física efectiva, pero son difíciles de impregnar en su micro estructura, por lo que su rigidez dieléctrica es esencialmente proveída por la rigidez dieléctrica del gas contenido entre estas fibras [26], normalmente para aplicaciones en bobinas de alta tensión hasta cierto nivel (13.8 kV), se utilizan aislamientos micáceos con respaldo de filmes, para el conductor. – Por este motivo, los aislamientos de vidrio impregnado deben ser evitados para el aislamiento del conductor de cobre, tanto por el requerimiento de una alta rigidez en los bordes, como por el sostenimiento dieléctrico entre espiras necesario para soportar las sobretensiones impulso.
- 15.** -Las normas para la realización de las pruebas de envejecimiento, por ejemplo la IEEE 1043-1996, o la IEEE Std 792, 1995, o la IEEE 275-1992, o la IEEE Std



429 –1994 son muy prolijas para sugerir la forma que deben tener las maquetas de la forma de las ranuras para el montaje de las bobinas para la ejecución de las pruebas de envejecimiento, indicando inclusive los radios de los bordes de los fierros de estos soportes, sin embargo, al indicar cómo deben ser las muestras a probar, muestran figuras de cortes de las bobinas, donde el esquema de los conductores de cobre es simplemente mostrado en forma cuadrada, sugiriendo mal al lector no comprometido con el tema, de que lo que se va a probar es el aislamiento y no el sistema de aislamiento formado por los electrodos y el aislamiento y que el conductor de cobre puede ser tomado de tal forma, obviando el problema de fondo, que es el verdadero causante del envejecimiento del dieléctrico, o sea, el esfuerzo del campo eléctrico en los bordes junto al filo del cuadrado que muestran en esos esquemas representando al cobre. – Aparentemente esto deviene de la inercia de la costumbre de haberse visto antiguamente este problema de los bordes en la A.T. como algo que se podía controlar simplemente redondeando los filos de los bordes [52] o de los perfiles, sean éstos del cobre o de las masas

16. -Tal como se ha indicado en la tabla 1.2 del capítulo I, [8], [9], que se refiere a la duración del aislamiento de mica-epoxy en función de la concentración mica/resina, existe un problema adicional en la zona de bordes que a menudo es soslayado debido a los costos de producción. – En los procesos de manufactura de las bobinas del tipo rígidas, o en otros tipos de manufactura donde en el proceso de curado pueda producirse el flujo de la resina desde las partes laterales hacia los bordes (donde puede haber un espacio dejado por el molde) originado

por la combinación de presión y temperatura aplicadas a las partes laterales por los platos calientes, puede ocasionar que se produzca un flujo de resina hacia los bordes, tal que la sección de la bobina resulte con una forma cuadrada en los bordes exteriores, copiando el molde o la ranura, empobreciendo la relación mica/resina, y siendo el aislamiento un cuerpo estratificado, el problema no se puede ocultar mediante un maquillaje de los bordes exteriores. – Esto puede ser el origen de fallas prematuras. – Se evita este problema mediante el uso de materiales termo-contráctiles para el prensado de los bordes del aislamiento- como auxiliares de los platos calientes -que solo presan los cuatro lados laterales- los que son costosos, tanto en la forma de materiales de conformado de la propia bobina, (*armor tapes* contráctiles) como en la forma de materiales auxiliares.

17. -Existe un efecto desfavorable en el comportamiento de los aglomerantes del tipo epoxy para temperaturas mayores de los 120°C; en presencia de niveles intensos del campo eléctrico; presentándose una relación entre la  $\tan \delta$ , corriente de dispersión, capacitancia, nivel de descargas parciales etc, vs. Temperatura, desfavorable (Figs 4.4 y 4.5); lo cual en resumen significa un incremento del nivel de pérdidas en el dieléctrico en función del campo eléctrico. – Esta característica significa una dependencia de la permitividad, en función del campo eléctrico para temperaturas por encima de la llamada temperatura umbral, seguida de la variación en el patrón del mapa de campo eléctrico, mostrado en la figura 4.6, al incrementarse la permitividad en el aislamiento que está junto al borde del cobre, aumenta la corriente de desplazamiento, o sea, aumenta la capacidad de

polarización del material, y con ello baja también su rigidez dieléctrica y aumenta el nivel de las descargas parciales en los huecos del aislamiento (Figs. 6.3 y 6.4) a despecho de la disminución del campo eléctrico junto a los bordes del paquete de conductores de cobre, resultando en una situación desfavorable que incrementa el envejecimiento.

- 18.** -No puede decirse a priori que un sistema de aislamiento tiene una performance dentro de lo estipulado por el índice de temperatura de sus constituyentes; esto depende de las características del compuesto final del aislamiento y de las concentraciones de campo eléctrico en los bordes y zonas convexas de la estructura de las bobinas (codos a la salida de las ranuras, que es la parte mas desfavorable) y para su evaluación por comparación con otras configuraciones cobre-aislamiento conocidas, existen varias normas [21], [25], [30].
- 19.** -En las bobinas de las máquinas rotativas de A.T. existen dos tipos de descargas superficiales: una es la que se produce en la zona de la parte activa que va montada en las ranuras, y se produce entre aquellas partes de la superficie exterior de los lados de bobina que no estén en firme contacto con el acero del núcleo magnético; el otro tipo de descargas superficiales es el que se produce en los finales de bobina, junto al núcleo, debido a la brusca aparición en la superficie de la bobina, de una fracción del potencial aplicado al cobre, por un efecto de reparto capacitivo.

- 20.** -Las descargas de ranura, en la superficie exterior de las bobinas, se controla proveyendo a la superficie exterior de las bobinas en la parte de la ranura, con un recubrimiento de naturaleza conductora, con el objeto de que las partes de la superficie de la bobina que no estuvieran en contacto con el núcleo, tengan un camino conductor para drenar la corriente dieléctrica, hacia los puntos que sí estén en contacto adecuado con la masa del núcleo.- Esta superficie conductora, se aplica a las bobinas de las máquinas de más de 4160 voltios de tensión nominal ( Fig. 5.4). -Cuando las máquinas de 4160 voltios o menos, son probadas durante un minuto con la tensión de prueba de  $2*U_N+1$  kV, las descargas parciales que se presentan no afectan mayormente al aislamiento sano.
- 21.** -Las descargas superficiales en la zona de los finales de bobina a la salida de las bobinas del núcleo, se presentan en las máquinas con tensiones de trabajo de 6.000 voltios y más. – Este problema se presenta debido a la brusca aparición en la superficie de la bobina, inmediatamente después de la superficie conductora de ranura, de parte del potencial aplicado al cobre, por un efecto de reparto capacitivo, el cual produce la ruptura de la rigidez dieléctrica del aire circundante produciendo un anillo de descargas que erosionaría al aislamiento de mica de la bobina (Figs. 5.7 y 5.8). -Este problema se controla, aplicando a la superficie de la bobina, desde el borde del núcleo, hasta cierta distancia, con un recubrimiento a base de carburo de silicio, que tiene una característica de conducción dependiente del campo eléctrico y funciona drenando hacia masa la corriente de dispersión desde el cobre de los finales de bobina cercanos al núcleo, en vez de que se fluya a través del aire circundante. - A esta superficie de control de la

aparición de parte del potencial del cobre en la superficie de las cabezas o finales de bobina, se la conoce como superficie de graduación del potencial o superficie de reparto ( Figs. 5.9 y 5.10)

22. -La superficie graduadora del potencial es aplicada según el nivel de tensión de las bobinas y puede ser aplicada en varias capas de longitud decreciente, con el objeto de lograr en las pruebas, un gradiente de potencial superficial de menos de 5 kV/cm. – Esto debe ser debidamente comprobado por el fabricante de las bobinas.
  
23. -La aplicación de tensión eléctrica (voltaje) a un aislamiento, por si sola, causa una lenta carbonización del material aglutinante y del material de soporte que se traduce en la característica de duración frente a la tensión o al campo eléctrico aplicado ( Fig.1.4). – Generalmente los aislamientos están diseñados para cumplir una vida efectiva de unas 25 a 35 mil horas de servicio. - Más allá de este tiempo de servicio, el aislamiento presentara un cierto grado de carbonización, y su condición puede ser evaluada mediante los ensayos establecidos en las normas [26], [27]
  
24. -En el mundo desarrollado, los clientes exigen la ejecución de pruebas de duración a muestras tomadas al azar del kit de bobinas que van a ser instaladas en máquinas importantes, las que se realizan por ejemplo de acuerdo a la norma IEEE 1043. – Esta prueba de duración es efectuada a temperatura de trabajo, y aplicando la tensión de prueba en forma ininterrumpida durante unas 400 horas. –

Antes de comenzar la prueba y al terminar, se mide la  $\tan\delta$  y el tip-Up en cada lado de la bobina, (Anexo ) los cuales son comparados para determinar si durante la prueba se ha manifestado algún proceso de deterioro. – Luego la muestra de la bobina es disecada para observar la calidad del encintado del aislamiento y los efectos de deterioro de la prueba. –En nuestro medio, no se efectúan este tipo de pruebas de control de calidad.

**25.** -El envejecimiento del aislamiento de las bobinas de las máquinas de A.T. se produce por cuatro factores principales: debido a la temperatura de los puntos más calientes del dieléctrico, debido a la tensión aplicada ( debería decirse debido al campo eléctrico máximo aplicado en las primeras bobinas o bobinas de línea), debido a los esfuerzos termomecánicos (expansiones y contracciones del cobre que esfuerzan al aislamiento contra las paredes de ranura produciendo el despegue de las capas de cinta de mica y conduciendo al efecto corona interno), y a las fuerzas electromecánicas y la vibración, producidas durante los arranques o los cortocircuitos, que producen el agrietamiento del aislamiento de las bobinas contra los bordes del núcleo y contra los propios elementos de sujeción de diseño inadecuado.

**26.** -El deterioro debido a las condiciones ambientales o de explotación, puede considerarse que es debido a la falta de control, falta de mantenimiento o aplicación inadecuada en una forma o diseño de máquina; por ejemplo la especificación y/o utilización de bobinas para uso en máquinas cerradas, en aplicaciones en máquinas abiertas para ambiente tropical o marino.

**27.** -La prueba de tensión aplicada o de suficiencia que se efectúa al bobinado de una máquina para su aceptación o durante su erección, no es una prueba para garantizar la calidad o durabilidad de un aislamiento sino meramente para determinar si el nivel de ruptura del aislamiento, está muy por encima del valor de prueba establecido y mostrar que las bobinas tienen su aislamiento sano y no se han cometido daños graves durante su montaje.

## BIBLIOGRAFÍA

1. -Marcelo Alonso, Edward J.Finn, “Física, Volumen II Campos y Ondas, Editorial Addison-Wesley Iberoamericana,S.A. 1987.
2. -Corrales Martínez, “Cálculo industrial de máquinas eléctricas”,
3. -John D. Kraus,Ph D.- Electromagnetismo, Ed. El Ateneo, Buenos Aires, 1960
4. -ETE, La escuela del técnico electricista, Técnica de la Alta Tensión, Tomo 12, Editorial Labor, SA Barcelona, 1973
5. -Von Roll Isola, Schweiz isola-werke breitenbach. “Electrical insulating materials”.
6. -VonRoll Isola Samicabond® “ A class H insulation system for high voltage rotating machines”
7. -VonRoll Isola “ Resin-Rich insulation systems for high voltage rotating machines”
8. -Friedrich Schindelmeiser, “ Resin-Rich and Resin-poor materials for class F and H systems, Insulec-80, International electrical insulation seminar, 20<sup>th</sup>/21<sup>st</sup> November 1980, Bombay, India. Session I-Part B-Paper 2. -AIK, AEG Isolier-und Kunststoff gmbh, Federal Republic of Germany.
9. -Friedrich Schindelmeiser “Insulating systems for High-voltage Hydrogenerators. AIK, AEG Isolier-und Kunststoff gmbh, Federal Republic of Germany.
10. -K. Kimura and S. Hirabayashi, “Improved potential grading methods with Silicon Carbide Paints, for High Voltage coils”. IEEE Transactions on Electrical Insulation Vol. EI-20 No.3 pp 511-517, June 1985.



11. - S.Rengarajan, M.D. Agrawal and R.S. Nema, "Behavior of High Voltage Machine Insulation System in the presence of thermal and Electrical stresses". IEEE Transactions on Electrical Insulation Vol. EI-20 No.1. pp 104-110, February 1985.
12. -H. Mitsui, Y Inoue, H. Yoshida, "Influence of Mica Tape application on insulation Characteristics of High voltage Rotating Machinery coils", IEEE Transactions on Electrical Insulation Vol. EI-20 No.3 pp 619-624.
13. -T.S.Ramu, "On the estimation of Life of Power Apparatus Insulation Under Combined Electrical and Thermal Stress". IEEE Transactions on Electrical Insulation Vol. EI-20 No.1, pp70-78, February 1985.
14. -Arnold Wichmann. "Two Decades of Experience and Progress in Epoxy Mica Insulation Systems for Large Rotating Machines". IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol PAS 102, No.1 pp 74-82, January 1983
15. -J.E.Neal. "Development of high voltage insulation systems for rotating machines. Ciba-Geigy (UK) LTD Plastics Division. Technical notes 4-1973
16. -MACALLEN ®, Essex Group, Inc Insulation Products. Mica paper Plate Products.
17. -Krempel, August Krempel Soehne Gmbh+Co. "Flexible Electrically conductive materials"
18. -Mantenimiento preventivo y predictivo de sub-estaciones, Curso auspiciado por la Doble Engineering Co. "Utilización de las pruebas de aislamiento para determinar el factor de potencia según el método de DOBLE. " UNITEC C◻T..Lima Abril de 1997

19. -Mario Celio Contin, Hugo G.Mello, “Estudio de las corrientes dieléctricas en materiales y en sistemas de aislamiento eléctrico”, WEG, Brasil.
20. -ANSI/IEEE std 43-2000, IEEE Recommended Practice for Testing Insulation Resistance of Rotating Machinery.
21. -ANSI/IEEE Std 95-1977, IEEE Recommended Practice of Insulation Testing of Large AC Rotating Machinery with High Direct Voltage.
22. -IEEE Std 522-1992, IEEE Guide for testing Turn-to Turn Insulation on Form-Wound Stator Coils for Alternating-Current Rotating Electric Machines.
23. -IEEE Std 792-1995, IEEE Recommended Practice for the evaluation of the impulse Voltage Capability of Insulation Systems for AC Electric Machinery Employing Form-Wound Stator Coils.
24. -ANSI/IEEE Std 434-1973/1981, IEEE Guide for Functional Evaluation of Insulation Systems for Large High-Voltage Machines.
25. -IEEE Std 429-1994, IEEE Recommended practice for Thermal Evaluation of Sealed Insulation Systems for AC Electric Machinery Employing Form-Wound Preinsulated Stator Coils for Machines Rated 6900 V and Below.
26. -IEEE Std. 432-1992, IEEE Guide for Insulation Maintenance for Rotating Electric Machinery (5 hp to less than 10 000 hp)
27. -IEEE/ANSI Std 56 1977, IEEE Guide for Insulation Maintenance of Large Alternating-Current Rotating Machinery ( 10 000 KVA and Larger)
28. -34-15 □ IEC: INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION  
Part 15: Impulse voltage withstand levels of rotating a.c. machines with form wound stator coils.

- 29.-CEI IEC 60-1 1989-11/ Second impression 1991 High- voltage test techniques  
Part 1: General definitions and test requirements.
- 30.-IEEE Std. 275-1992 IEEE Recommended Practice for Thermal Evaluation of  
Insulation Systems for Alternating-Current Electric Machinery Employing  
Form-Wound Preinsulated Stator Coils for Machines Rated 6900 V and Below.
- 31.-Electrical Transmission and Distribution Reference book, Westinghouse Electric  
Corporation, East Pittsburgh, Pennsylvania. Fourth edition 1950.
- 32.-Testing of magnet wire for inverter motor applications, Don Barta, Weijun Yin,  
and Dan Loryan.
- 33.- AIK Insulation Systems for Electrical Machines.- AEG ISOLIER-UND  
KUNSTSTOFF GMBH, Kassel-Waldau, Germany.
- 34.- XI CONIMERA.- Ricardo Vásquez, Juan Casani.- CENTROMIN PERU, Junio  
1993 Lima Perú.
- 35.-Travelling waves in induction machines: input impedance and equivalent  
circuits.- E.M. Freeman, B.Sc.(Eng.), Ph.D.- Proc. IEE Vol 115 No. 12.  
December 1968.
- 36.-UNE 20894 IN.- Guía para un procedimiento de ensayo para la medición de la  
tangente del ángulo de pérdidas de las bobinas y barras para devanados de  
máquinas. Asociación Española de Normalización y Certificación.
- 37.-ISOVOLTA.- Ein isoliersystem der Isolationsklasse F.- Osterreichische  
isolierstoffwerke Aktiengesellschaft, Austria.
- 38.-Cost Effective Motor Surge Capability.- Richard L. Doughy, and Frank  
Heredos.- IEEE transactions on Industry Applications, Vol 33, No. 1

January/February 1997.

39. -Design And Application Considerations for Motors in Steep- Fronted Surge Environments. – Nirmal K. Ghai. IEEE Transactions on Industry Applications , Vol 33, No. 1, January/February 1997.
40. -On Line Monitoring of Partial Discharges On Stator Windings of Large rotating Machines in The Petrochemical Environment.- Andreas Betge,Patrick Lo., J. Phillipson, J. Weidner.- IEEE Transactions on Industry Applications, Vol 34, No. 6 November/December 1998.
41. -Stator Winding Monitoring.- Greg Stone, Joe Kapler, .-IEEE Cement Industry Conference. 1997.- Industry Applications Magazine. September-October 1998
42. -Técnicas para el mantenimiento y diagnostico de maquinas eléctricas rotativas.- M. Fernández, M. García, G. Alonso, J. Cano, J. Solares. Ed. Marcombo, Barcelona. 1998.
- 43.- IEEE Std. 1064 1991.- IEEE Guide for Multifactor Stress Funcional Testing of Electrical Insulation Systems.
- 44.- IEEE Std. 1129-1992. – IEEE Recommendation Practice for Monitoring and instrumentation of Turbine Generators.
- 45.- IEEE Std.67.-1990 IEEE Guide for operation and maintenance of turbine generators.
46. – Calculo de fuerzas en las cabezas de bobinas.
47. – IEEE Std 1310-1996 IEEE Trial Use Recommended Practice for Thermal Cycle Testing of Form Wound Stator Bars and Coils for Large Generators.
48. –ANSI/IEEE Std 433-1974 (Reaff 1979) IEEE Recommended Practice for Insulation Testing of Large AC Rotating Machinery with High Voltage at Very

Low Frequency.

49. –IEEE Std 1043 -1996. IEEE Recommended Practice for Voltage endurance.
50. –IEEE Std. 1313-1993 ( ANSI C92.1-1987). IEEE Standard for Power Systems – Insulation Coordination.
51. –Introducción al estudio del elemento finito en ingeniería. – Tirupathi Chandrupatla, Ashok Belegundu, Prentice Hall, Segunda Edición.
52. –ASTM B48-00. Standard Specification for Soft Rectangular and Square Bare copper Wire for Electrical Conductors.
53. –ASTM D 149-97a Standard Test Method for Dielectric Breakdown Voltage and Dielectric Strength of Solid Electrical Insulating Materials at Commercial Power Frequencies.
54. –Partial Discharge Theory and applications to Electrical Equipment. - Gabe Paoletti, P.E, Alex Golubev, PhD. – Cutler- Hammer Engineering Services.