



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FISICAS Y MATEMATICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA ELECTRICA

**RAZÓN DE ABSORCIÓN DIELECTRICA PARA DIAGNOSTICAR EL ESTADO DE UNA
AISLACION**

**MEMORIA PARA OPTAR AL TITULO DE INGENIERO CIVIL
ELECTRICISTA**

CAMILO ALEJANDRO GARAY BRAVO

PROFESOR GUIA:
ARIEL VALDENEGRO ESPINOZA

MIEMBROS DE LA COMISION:
MIGUEL SEGURA CARRASCO
EFRAIN ASENJO SILVA

SANTIAGO DE CHILE
AGOSTO 2009

RESUMEN DE LA MEMORIA
PARA OPTAR AL TITULO DE
INGENIERO CIVIL ELECTRICISTA
POR: CAMILO GARAY B.
FECHA: 20/08/2009
PROF. GUIA: Sr. ARIEL VALDENEGRO E.

“RAZÓN DE ABSORCIÓN DIELECTRICA PARA DIAGNOSTICAR EL ESTADO DE UNA AISLACION”

En este trabajo de título se hace una investigación bibliográfica del tema de la resistencia de aislación, el índice de polarización (IP) y la razón de absorción dieléctrica (DAR) como métodos para diagnosticar el estado de una aislación. Se estudian las características que tienen los sistemas aislantes y los fenómenos que ocurren en ellos al aplicarles una tensión continua. Además se describen niveles de tensión para realizar el test de resistencia de aislación y valores tentativos del IP y del DAR para definir el estado de una aislación.

La segunda parte de este trabajo corresponde a la descripción de cuatro experiencias realizadas en laboratorio para verificar la eficacia y veracidad del DAR como método para diagnosticar el estado de una aislación, esto se logra mediante la comparación empírica de los resultados del DAR con los diagnósticos que entrega el IP. Las primeras dos experiencias se realizaron en el laboratorio de Alta Tensión del Departamento de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de Chile, y las últimas dos experiencias en el laboratorio de la empresa Nexans S. A.

Para cada experiencia se simuló distintas condiciones del estado de una aislación, sometiéndola a diferentes anomalías para así poder comparar los resultados de ambas razones en un rango más amplio de situaciones, considerando variados factores que afectan el valor de la resistencia de aislación.

En la última parte se discuten las conclusiones ligadas a la comparación entre lo teórico y lo obtenido en laboratorio, y se analiza para cada experiencia la correlación existente entre el DAR y el IP. En resumen, se confirma que el DAR sirve como criterio para determinar el estado de una aislación, existiendo una alta correlación entre ambos índices en los cuatro casos estudiados. Finalmente es importante mencionar la necesidad de realizar un estudio similar, pero en equipos en funcionamiento y con fallas reales.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a las personas que me ayudaron en este proceso. Principalmente a los señores Ariel Valdenegro, Miguel Segura y Carlos Quezada, que de alguna manera entendieron mi necesidad de entrar al mundo laboral.

INDICE DE TEMAS

1.	INTRODUCCIÓN.....	1
2.	MARCO TEÓRICO.....	2
2.1.	Aplicación de voltaje continuo a una aislación	2
2.1.1.	Mecanismos de conducción	2
2.1.2.	Conducción en aislantes sólidos	3
2.2.	Propiedades dieléctricas	4
2.2.1.	Campo eléctrico en un material aislante	4
2.2.2.	Polarización dieléctrica	6
2.3.	Absorción Dieléctrica	8
2.3.1.	Corriente capacitiva geométrica.....	9
2.3.2.	Corriente de Absorción	10
2.3.3.	Corriente de conducción	12
2.3.4.	Principio de superposición	13
2.3.5.	Determinación de la corriente de conducción en ensayo de voltaje continuo.....	14
2.4.	Resistencia de aislación	15
2.4.1.	Resistiva superficial (ρ_s)	16
2.4.2.	Resistividad volumétrica (ρ_v)	17
2.4.3.	Factores que afectan el valor de la resistencia de aislación.....	19
2.4.4.	Disminución de la resistencia de aislación	23
2.4.5.	Valores mínimos de resistencia de aislación	24
2.4.6.	Medidas de la corriente de absorción y valores tentativos del DAR y el IP para diagnosticar el estado de una aislación.....	26
3.	Trabajo experimental	28
3.1.	Elementos constituyentes de las experiencias.....	28
3.2.	Experiencias	29
3.2.1.	Experiencia 1: Medidas de resistencia de aislación en una bobina preformada de 13,8 [kV].....	29
3.2.2.	Experiencia 2: Medidas de resistencia de aislación en conductor de una metro, calibre 7AWG, aislación de goma.....	38

3.2.3.	Experiencia 3: Medidas de resistencia de aislación en una placa de aislación tipo XLPE.....	46
3.2.4.	Experiencia 4: Medidas de resistencia de aislación en un conductor de 15 metros de largo, aislación tipo XLPE y calibre 16 AWG	53
4.	Conclusiones	59
4.1.	Conclusiones del marco teórico	59
4.2.	Conclusiones del trabajo experimental	60
5.	Bibliografía.....	62

1. INTRODUCCIÓN

Este informe es el resultado de un trabajo de investigación y laboratorio para optar al título de Ingeniero Civil Electricista de la Universidad de Chile y cuyo tema central consiste fundamentalmente en confirmar el criterio de la razón de absorción dieléctrica (DAR) para determinar el estado de una aislación. La manera de lograrlo es mediante la comparación empírica entre el DAR y el índice de polarización (IP).

La primera parte de este trabajo es una investigación bibliográfica sobre la resistencia de aislación, el índice de polarización (IP) y la razón de absorción dieléctrica (DAR) de una aislación, y cómo con la obtención de estos valores se puede diagnosticar el estado de una aislación. Esta parte del informe se basa principalmente en los apuntes del curso "Aislación de un Equipo de Alta Tensión" [1] y la norma IEEE "Recommended Practice for Testing Insulation Resistance of Rotating Machinery" [2] (IEEE Std 43-2000 (R2006)).

La segunda parte de este trabajo de título describe una serie de pruebas que se realizaron en el Laboratorio de Certificación de Calidad de la Empresa Nexans S.A. (antiguamente Madeco Cables S.A.) y en el laboratorio de Alta Tensión del Departamento de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de Chile. En estos ensayos se midió la variación en el tiempo de la resistencia de aislación de una bobina preformada de un generador eléctrico, dos conductores eléctricos de distinto calibre y aislación y de una probeta de aislación tipo XLPE, sometiéndolas a diferentes anomalías. Se describen el montaje de los equipos, las experiencias y el análisis de los resultados.

Finalmente, en la última parte de este informe se dan a conocer las conclusiones del trabajo de laboratorio y se contrastan con respecto al marco teórico expuesto.

2. MARCO TEÓRICO

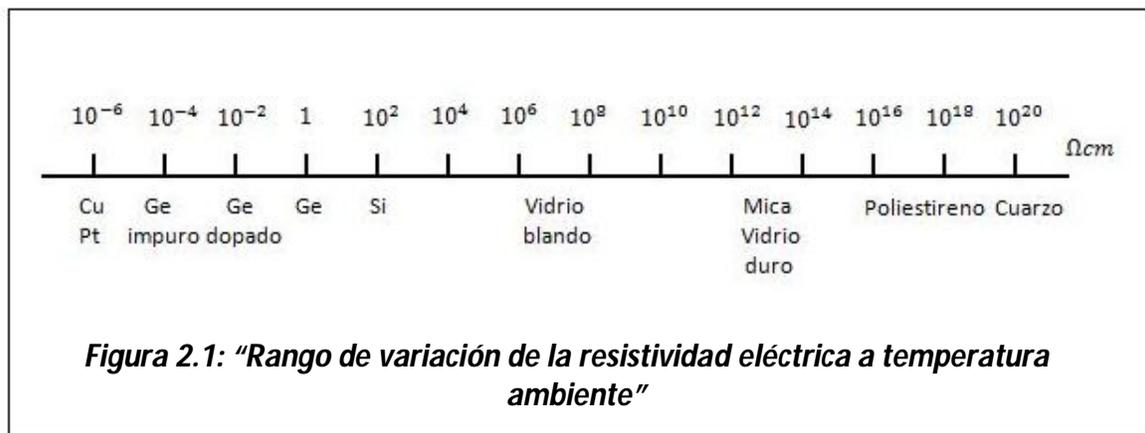
En este capítulo se hace una revisión bibliográfica [1] sobre los fenómenos dieléctricos que suceden en un sistema de aislación al aplicarle un voltaje continuo, describiendo los mecanismos de conducción en aislantes sólidos, los distintos tipos de corrientes que se manifiestan, principios físicos que las determinan y maneras para calcularlas sabiendo el valor de la corriente total. Se revisa en profundidad la realización del test de resistencia de aislación y se definen el índice de polarización y la razón de absorción dieléctrica como métodos para diagnosticar el estado de una aislación.

2.1. Aplicación de voltaje continuo a una aislación

2.1.1. Mecanismos de conducción

La conducción de electricidad en sólidos puede deberse al transporte de electrones (metales y aleaciones), al transporte de electrones y huecos (en semiconductores) o al transporte de iones (en aislantes eléctricos).

El rango de variación de la resistividad eléctrica a temperatura ambiente es uno de los más amplios conocidos entre las propiedades de los materiales; se extiende por 25 décadas, como muestra la figura 2.1.



A pesar de que la resistividad eléctrica de los materiales sólidos se extiende en forma continua en el rango indicado, se acostumbra a clasificar los sólidos en: conductores, semiconductores y aislantes.

Si se consideran temperaturas inferiores a la ambiente, habría que tomar en cuenta el fenómeno de la superconductividad, con lo cual se amplía en varias décadas el

rango de variación de la conductividad de los materiales sólidos y aparece un cuarto grupo de materiales: el de los superconductores.

En lo que sigue se verá con algún detalle sólo los materiales aislantes, también llamados dieléctricos.

2.1.2. Conducción en aislantes sólidos

En los materiales aislantes, la conductividad eléctrica se debe principalmente a iones. La conducción de electrones es muy pequeña a temperatura ambiente, debido a que la separación entre la banda de valencia, que está totalmente llena de electrones (a 0 °K), y la banda de conducción es del orden de 10 eV. La energía media de agitación térmica a temperatura ambiente es del orden de $\frac{1}{40}$ eV, por lo cual a temperatura ordinaria el número de electrones que pueden pasar de la banda de valencia a la de conducción es despreciable.

En los aislantes, la conducción de la electricidad se realiza principalmente por el transporte de iones y el mecanismo exacto depende de la estructura del material.

En los aislantes cristalinos tales como NaCl, cuarzo, silicatos, mica, etc. cada átomo o ión posee una ubicación bien precisa en el cristal, siendo difícil desplazarlos a través del material. El movimiento de los iones se ve facilitado por la presencia de imperfecciones en el cristal, especialmente de tipo vacantes.

En los materiales aislantes orgánicos, el mecanismo de conducción es algo diferente. Los materiales orgánicos normalmente constan de moléculas neutras, muy pocas de ellas ionizadas. Los pocos iones existentes se producen por efecto de la disociación de moléculas provocada por la agitación térmica. Debido a la naturaleza estadística de la agitación térmica, siempre es posible que, a temperatura ambiente o superior, algunas moléculas adquieran una energía suficiente como para ser disociadas, aunque el enlace sea muy fuerte. Los efectos de la disociación dependen de la naturaleza del material. En el caso más favorable las moléculas se disocian y recombinan con igual velocidad alcanzándose una condición de equilibrio dinámico sin que se produzcan cambios permanentes en la materia. Si hay campo eléctrico aplicado, se producirá una conducción iónica, que puede deteriorar la aislación ya sea por calentamiento o debido a la formación de productos perjudiciales por acción de los iones transportados a los electrodos. Aun en ausencia de un campo aplicado puede que los iones no se recombinen para formar el compuesto químico inicial. Así, los iones pueden reaccionar formando

moléculas más simples, o reaccionar con el oxígeno o agua del medio. En este caso el material se descompone u oxida lentamente.

La disociación es favorecida no sólo por las altas temperaturas sino además por las elevadas permitividades de algunos materiales o por las radiaciones, especialmente la ultravioleta. La energía necesaria para separar los iones de signo opuesto es inversamente proporcional a la permitividad del material y el número de iones aumenta exponencialmente con la disminución de esta energía. Debido a lo anterior prácticamente no hay materiales de alta permitividad que tengan una buena resistencia de aislación. El agua, debido a su alta permitividad (permitividad relativa $\epsilon_r \approx 80$ en estado líquido) favorece la disociación de cualquier substancia que la absorba y la mayoría de sus efectos perjudiciales en las aislaciones se deben a esto.

2.2. Propiedades dieléctricas

Se entiende por material dieléctrico, uno cuyo comportamiento es lineal; si además el material es isótropo, las relaciones lineales entre los tres vectores del campo (\vec{E} , \vec{D} , \vec{P}) serán de forma simple. Por ejemplo materiales piezoeléctricos también son lineales, pero por ser no isótropos las relaciones que ligan los tres vectores del campo eléctrico, aunque lineales son más complicadas que las anteriores. Existen otros materiales, los ferroeléctricos, cuyo comportamiento es no-lineal, pero al igual que los piezoeléctricos no se verán en detalle, debido a que tienen poca importancia en la aislación de los equipos eléctricos.

2.2.1. Campo eléctrico en un material aislante

Es útil analizar el comportamiento de un material dieléctrico o aislante empleando conceptos del campo eléctrico. Para ello es muy ilustrativo analizar la diferencia que existe entre un material conductor y uno aislante.

Por definición un conductor es un material que contiene electrones (u otras partículas cargadas) que pueden moverse libremente por acción de un campo eléctrico, a través de distancias que son grandes en comparación con las dimensiones atómicas. Al poner un conductor en presencia de un campo eléctrico, se ejercen fuerzas sobre los electrones libres y estos se mueven hasta alcanzar un estado de equilibrio. Los electrones se redistribuyen de tal modo que el campo creado por ellos neutraliza totalmente el campo aplicado en todos los puntos interiores del conductor. Para que un conductor se halle en equilibrio, el campo eléctrico E en su interior debe ser nulo. Si en el interior del

conductor $\vec{E} = 0$, se tendrá que la $\nabla \cdot \vec{E} = 0$ y por lo tanto $\rho = 0$ (densidad de carga volumétrica). De lo anterior se deduce que la carga neta se debe concentrar en la superficie del conductor y se debe distribuir de modo de hacer $\vec{E} = 0$, en todos los puntos interiores del conductor. Como $\vec{E} = -\nabla\psi$, el potencial ψ en el interior del conductor debe ser constante ($\psi = 0$).

Al contrario de un conductor, un dieléctrico o aislante se caracteriza en el caso ideal porque no contiene electrones libres (u otras partículas cargadas) o porque no las posee en número apreciable en el caso real. Esto significa que las cargas eléctricas que hay en el interior de un dieléctrico se hallan ligadas a sus posiciones. Como las fuerzas eléctricas son de carácter elástico, al aplicar un campo eléctrico, las cargas eléctricas positivas y negativas se desplazarán en una pequeña distancia en sentidos contrarios creándose, en el interior del dieléctrico, dipolos eléctricos elementales. El efecto del material aislante sobre el campo eléctrico se toma en cuenta definiendo para cada punto un vector polarización dieléctrica \vec{P} igual al momento dipolar eléctrico por unidad de volumen.

Si $\sum \vec{p}$ es la suma vectorial de los dipolos contenidos en un elemento de volumen Δv , el vector P se define como:

$$\vec{P} = \lim_{\Delta v \rightarrow 0} \frac{\sum \vec{p}}{\Delta v} \quad (2.1)$$

El efecto de los dipolos en el dieléctrico se puede tomar en cuenta definiendo el vector desplazamiento eléctrico \vec{D} dado por:

$$\vec{D} = \epsilon_0 \vec{E} + \vec{P} \quad (2.2)$$

De este modo se pueden aplicar a los medios dieléctricos homogéneos e isotrópicos, las mismas leyes de la electrostática en el vacío, simplemente reemplazando $\epsilon_0 \vec{E}$ por \vec{D} . En el vacío, evidentemente $\vec{P} = 0$ y por lo tanto $\vec{D} = \epsilon_0 \vec{E}$.

En los materiales dieléctricos, la polarización \vec{P} es directamente proporcional al campo eléctrico (salvo para campos muy grandes) y la constante de proporcionalidad es $\epsilon_0\chi'$ en que χ' es la susceptibilidad real del material. Por lo tanto se tiene:

$$\vec{D} = \epsilon_0(1 + \chi')\vec{E} \quad (2.3)$$

Y siendo ϵ_r la permitividad relativa o constante dieléctrica del material ($\epsilon_r = \frac{\epsilon'}{\epsilon_0}$) en que ϵ' y ϵ_0 son las permitividades del dieléctrico y del vacío respectivamente.

Resulta

$$\epsilon_r = 1 + \chi' \quad (2.4)$$

Estas relaciones son validas para campos estáticos o para campos alternos en dieléctricos sin pérdidas.

2.2.2. Polarización dieléctrica

Como se dijo, los materiales dieléctricos se caracterizan porque poseen muy pocas cargas eléctricas libres, siendo la mayoría de ellas del tipo ligadas. Estas cargas ligadas provocan una polarización del medio, al serle aplicado un campo eléctrico. Los fenómenos de polarización se pueden clasificar en cuatro tipos: polarización electrónica, polarización iónica o atómica, polarización de orientación dipolar y polarización interfacial.

2.2.2.1. Polarización electrónica

Por efecto de un campo eléctrico aplicado, las orbitas electrónicas de los átomos de un material se desplazan y se deforman adquiriendo cada átomo un momento dipolar inducido. Esta polarización es prácticamente instantánea a la escala de los fenómenos que interesan en el comportamiento de las aislaciones. Se establece en tiempos del orden de 10^{-15} s y sus efectos en campos alternos se manifiestan a frecuencias en la zona visible y ultravioleta en que se acostumbra describir un material por su índice de refracción n ($\epsilon' = n^2$).

2.2.2.2. Polarización atómica

La polarización atómica se produce debido al desplazamiento relativo de los iones positivos y negativos en los cristales iónicos o en ciertas estructuras moleculares. Este fenómeno es también muy rápido (10^{-12} s) y sus efectos se manifiestan en la zona infrarroja del espectro. Al igual que la polarización electrónica, se puede suponer que este fenómeno es prácticamente instantáneo en relación con el comportamiento de las aislaciones.

2.2.2.3. Polarización por orientación dipolar

Esta polarización se presenta en los materiales polares, es decir en aquellos materiales que poseen moléculas con dipolos eléctricos permanentes. Los dipolos permanentes no provocan polarización en ausencia de un campo externo, porque se hallan orientados al azar y sometidos al movimiento de agitación térmica de las moléculas. Cuando se aplica un campo eléctrico al material polar, los dipolos individuales tienden a orientarse preferencialmente en el sentido del campo aplicado, produciéndose así una polarización del medio. A la orientación de los dipolos se opone el movimiento de agitación térmica de las moléculas, por lo cual este fenómeno es dependiente de la temperatura.

La polarización de orientación es más lenta que las electrónica y atómica. Se establece en tiempos que van de los 10^{-4} a 10^{-9} s y por lo tanto sus efectos con voltaje alterno se manifiestan en un rango que van de alta frecuencia hasta microondas.

2.2.2.4. Polarización interfacial

Esta polarización se produce en los materiales heterogéneos constituidos por una mezcla de dos o más materiales cuyas permitividades y conductividades eléctricas son diferentes entre sí. En este sentido se diferencia de las demás polarizaciones que se producen a escala atómica y no macroscópica como en este caso. El fenómeno se puede visualizar analizando un caso límite en que se tiene una aislación mezcla de un material aislante perfecto con un conductor.

Si se aplica un voltaje a la aislación, las cargas eléctricas libres, en las porciones conductoras, se desplazarán a la superficie de dichas porciones ya que no podrán circular a través del aislante perfecto que las rodea. Se producen así dipolos eléctricos a escala

macroscópica, que equivalen a una polarización del medio y que contribuyen por lo tanto a la constante dieléctrica del material.

A diferencia de las anteriores, la polarización interfacial tiene tiempos de relajación muy altos, pudiendo llegar a ser del orden de varios segundos o aun minutos y horas. Esto último tiene especial importancia en los fenómenos que se producen durante la carga y descarga de condensadores dando lugar al fenómeno conocido como absorción dieléctrica.

2.3. Absorción Dieléctrica

En el estudio de los fenómenos de polarización dieléctrica se vio que desde el punto de vista de lo que sucede en la práctica en las aislaciones de alto voltaje, se puede considerar que las polarizaciones electrónica, atómica y de orientación se establecen en forma instantánea. En cambio la polarización interfacial es muy lenta, con tiempos de relajación que pueden alcanzar varios segundos o incluso minutos y horas. Los fenómenos a que da lugar la polarización interfacial en un aislante heterogéneo se conocen bajo el nombre de absorción dieléctrica.

Cuando a una aislación se le aplica un voltaje continuo la corriente que circula se puede dividir en tres componentes:

- a) corriente capacitiva geométrica
- b) corriente de absorción
- c) corriente de conducción.

La corriente total se puede medir con microamperímetro o un megóhmetro. Como las corrientes de la de absorción y capacidad geométrica son dependientes del tiempo, la corriente o resistencia que se mida resultará dependiente del tiempo. Obviamente el voltaje continuo aplicado y la corriente que circula por el aislante no están relacionados por la ley de Ohm como sucede con un elemento puramente resistivo. Sólo para un tiempo infinito de aplicación del voltaje continuo, la razón de voltaje aplicado a corriente será igual a R , la resistencia de aislación. En los instantes previos a la estabilización de la corriente, lo que se mide es una resistencia aparente.

2.3.1. Corriente capacitiva geométrica

La componente de corriente que resulta de la capacidad geométrica de la aislación (corriente capacitiva geométrica) es una función del tiempo exponencial de la forma:

$$i_g = \frac{V_{cc}}{R} e^{-\frac{t}{RC}} \quad (2.5)$$

En que V_{cc} es el voltaje en circuito abierto de la fuente de c.c. y R su resistencia interna que incluye cualquier otra resistencia serie que pueda existir en el circuito hasta la aislación en prueba. La capacidad C es la capacidad geométrica y en estricto rigor, como lo indica su nombre, debería depender sólo del área, forma y separación de las placas del condensador en el vacío. Sin embargo se sabe que desde un punto de vista práctico, a frecuencia industrial o inferior, los fenómenos de polarización electrónica, iónica y de orientación se pueden considerar instantáneos. Por lo tanto se puede tomar como capacidad C la provocada por las contribuciones a la permitividad de estas polarizaciones excluyendo únicamente la contribución de la polarización interfacial. En la práctica se puede tomar como capacidad C la que se mide con C.A. de 50 a 1000 Hz y en lo que sigue se llamará simplemente capacidad.

En el instante de la aplicación o de incremento del voltaje se puede ver da la expresión de i_g que ésta queda limitada únicamente por la resistencia serie del circuito. Si el voltaje de la fuente se mantiene constante, la corriente capacitiva decrecerá a 0.3868 de su valor inicial en un tiempo igual a la constante de tiempo RC de carga del circuito. En un tiempo $4.6 RC$, decrecerá a un 1% de su valor inicial.

Normalmente la corriente capacitiva i_g no se toma en cuenta al evaluar el estado de una aislación, pero en circuitos con constantes de tiempo extremadamente altas, i_g puede distorsionar las medidas de corriente o de resistencia. Por ejemplo, un cable de 15 km de largo puede tener una capacidad de orden de $6 \mu F$ y si el ensayo se realiza utilizando una resistencia R de $3 M\Omega$, el tiempo necesario para alcanzar el 99% del voltaje será de: $6 \cdot 10^{-6} \cdot 3 \cdot 10^6 \cdot 4.6 = 83$ segundos. Si se realiza la medición a los 60 segundos, resultaría así un error significativo.

La corriente de carga capacitiva, al igual que la de absorción, representa una energía almacenada reversible en la aislación. Es la misma corriente que se descarga

inicialmente al cortocircuitar la aislación después de finalizado el ensayo. La expresión de la corriente de descarga es la misma que la de carga i_g .

2.3.2. Corriente de Absorción

La componente de corriente debida a la absorción dieléctrica en los dieléctricos heterogéneos es provocada por las polarizaciones lentas y desaparece cuando la frecuencia del voltaje aplicado aumenta; cuando $\omega \gg \frac{1}{\tau}$, siendo τ el tiempo de relajación de la polarización. Lo más importante de esas polarizaciones lentas en lo que respecta a los fenómenos que se producen con C.C., es la polarización interfacial. En algunos casos puede suceder que el material presente una polarización de orientación dipolar suficientemente lenta como para ser también incluida en la corriente de absorción. La corriente de absorción resultante, representa una energía almacenada reversible que se puede liberar después de eliminado el voltaje continuo aplicado. Esta energía es la causante de que el voltaje de los electrodos o placas de un dieléctrico, reaparezca después que la energía almacenada resultante de la corriente capacitiva ha sido disipada mediante un cortocircuito y luego éste ha sido eliminado. Por este motivo la aislación en ensayo, por razones de seguridad, debe ser cortocircuitada durante un tiempo largo después que ha finalizado el ensayo. El cortocircuito debería mantenerse en la aislación en prueba por lo menos durante un tiempo igual al tiempo de ensayo y preferentemente por un tiempo cuatro veces mayor. Esta precaución es especialmente importante en las aislaciones que presentan una corriente de fuga muy pequeña durante los ensayos.

La componente de la absorción de la corriente en los rangos usuales de tiempos de ensayo se puede expresar como:

$$i_a = \Delta VCDt^{-n} = At^{-n} \quad (2.6)$$

En que:

i_a	=	Corriente de absorción [μA]
ΔV	=	Incremento de voltaje aplicado [V]
C	=	Capacidad de aislación [de 50 a 1000 Hz]
D	=	Factor de proporcionalidad en 0/1 del voltaje aplicado y de la capacidad
A	=	ΔVCD
n	=	Constante
t	=	Tiempo [en minutos]

El factor D depende del tipo de aislación y de su condición y temperatura. Se puede determinar midiendo la magnitud de la corriente total durante un ensayo de carga de la capacidad después que la corriente capacitiva ha prácticamente desaparecido y antes de que la corriente de conducción pase a ser una parte apreciable de la corriente medida. Para lograr esto, sin conocer previamente el valor de n , es necesario hacer $t = 1 \text{ minuto}$. Por ejemplo si la constante de tiempo de la corriente capacitiva es razonablemente pequeña y la corriente de conducción es despreciable, una buena aproximación para D se puede obtener midiendo la corriente un minuto después de aplicado el voltaje. Si la corriente de conducción es apreciable para un minuto el valor de D se puede aproximar realizando una prueba de carga completa y restando la corriente de conducción restante de la corriente total medida. La diferencia representa la componente de absorción para cualquier tiempo t .

La constante n normalmente está comprendida entre cero y uno y define la tasa de absorción del dieléctrico y de las impurezas que contiene. Como la corriente de absorción es de la forma t^{-n} , el exponente n es la inclinación de la recta corriente-tiempo que se obtiene al llevar los resultados en un gráfico log-log. Una buena aproximación para D y n se puede lograr cargando en primer lugar en forma completa la aislación y luego midiendo sólo la corriente de absorción en un ensayo de descarga.

La corriente de absorción se puede obtener con facilidad de la corriente total si la corriente de conducción es relativamente pequeña. Por ejemplo, si para un voltaje aplicado constante se observa una corriente que decrece continuamente después que ha desaparecido la corriente capacitiva, se tiene una evidencia segura de que la corriente de conducción es despreciable. Si la corriente de conducción es muy pequeña la corriente de absorción decreciente se puede observar durante minutos o aun horas antes de que sólo quede la corriente de conducción.

Los métodos del índice de polarización (IP) y razón de absorción dieléctrica (DAR) para determinar el estado de una aislación se basan en las magnitudes relativas de las corrientes de absorción y conducción. El índice de polarización se define como la razón de la suma de las corrientes de absorción y de conducción correspondientes para 1 minuto a la suma de esas mismas corrientes para 10 minutos, razón que depende de las magnitudes relativas de dichas corrientes. Por otro lado la razón de absorción dieléctrica se define como la razón de la suma de ambas corrientes correspondientes para 30 segundos a la suma de esas mismas corrientes para 1 minuto. Como el voltaje aplicado es constante en todo tiempo, estas dos razones se pueden obtener a partir del valor de la resistencia de aislación.

$$IP = \text{Índice de polarización} = \frac{RA_{10m}}{RA_{1m}} \quad (2.7)$$

$$DAR = \text{Razón de Absorción Dieléctrica} = \frac{RA_{1m}}{RA_{30s}} \quad (2.8)$$

2.3.3. Corriente de conducción

La corriente de conducción (de fuga) es la más importante, cuando se trata de evaluar el estado de una aislación empleando métodos C.C. como por ejemplo el escalón de voltaje. La corriente de conducción puede circular sea a través del volumen de la aislación o por las superficies de fuga tales como las de los aisladores terminales. La corriente de conducción, al contrario de las componentes capacitiva y de absorción, representa una corriente de pérdida no reversible. Si las fugas en las superficies terminales son despreciables, la magnitud de la corriente de conducción es proporcional a la capacidad de aislación. La corriente de conducción i_c está determinada por la ley de Ohm:

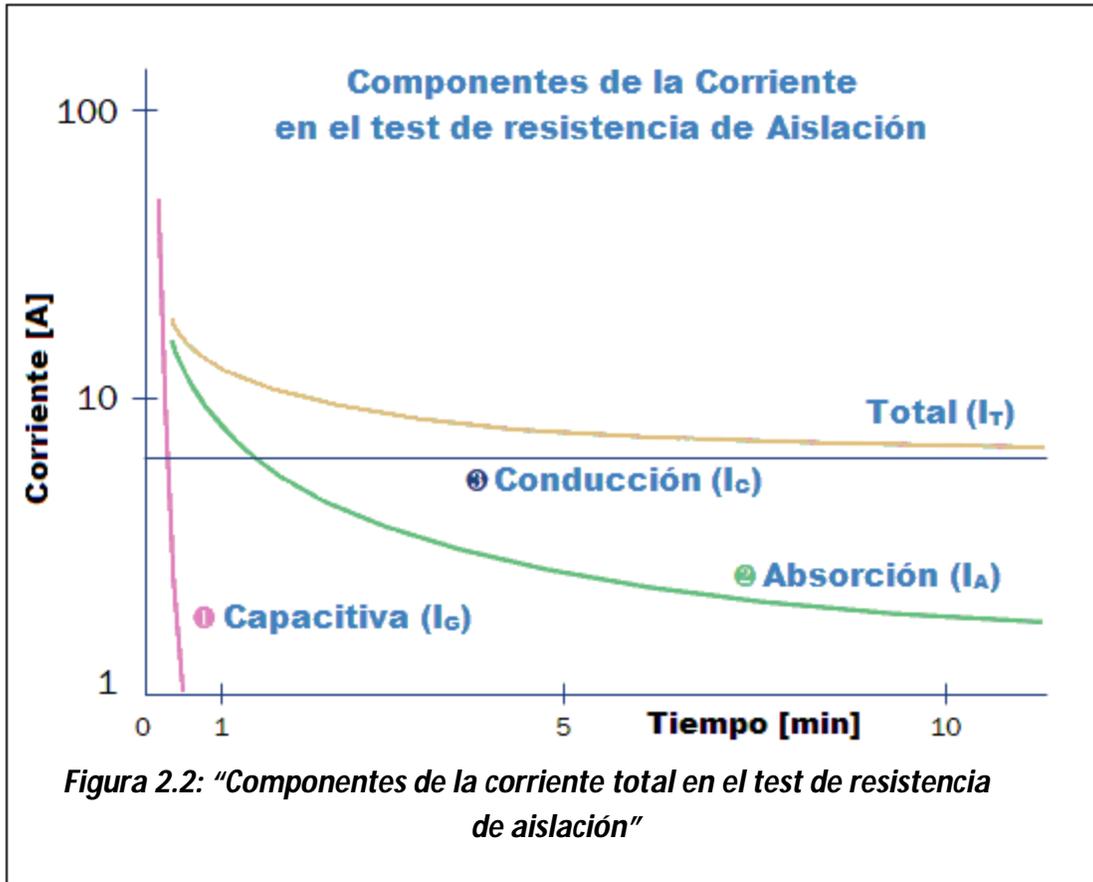
$$i_c = \frac{V_{cc}}{R_a} \quad (2.9)$$

En que:

V_{cc} = Voltaje continuo aplicado
 R_a = Resistencia de aislación

Teóricamente la corriente de conducción debería ser constante en el tiempo para cualquier valor fijo del voltaje continuo aplicado. Esta constancia en el tiempo es una buena indicación de que la aislación en ensayo puede soportar bien el voltaje aplicado. Cualquier tendencia de esta corriente a aumentar gradualmente en el tiempo para un voltaje aplicado constante, es una advertencia de que la aislación en ensayo puede ser dañada si se continúa la prueba a dicho voltaje.

En la figura 2.2 se muestran las tres componentes de la corriente y su correspondiente suma.



2.3.4. Principio de superposición

Una propiedad importante de la corriente de absorción, es que cumple con el principio de superposición. Este hecho que parece obvio, a primera vista no debería complicar la interpretación del fenómeno. De hecho no se introducen complicaciones si cada ensayo se realiza a un voltaje fijo y la energía almacenada se elimina completamente antes de realizar un nuevo ensayo. Sin embargo cuando los ensayos se realizan de acuerdo al método del escalón de voltaje, en que la aislación no se descarga completamente entre los escalones, la corriente de absorción es la suma algebraica de todas las corrientes resultantes de todos los incrementos de voltaje aplicados.

Como la corriente que resulta de cada escalón de voltaje es de la forma $\Delta VCDt^{-n}$, la corriente de absorción total será la suma de los términos análogos a éste, en que el origen de t para cada término corresponde al instante de aplicación del respectivo incremento de voltaje.

Redefiniendo t en la forma recién mencionada, se obtiene la siguiente expresión para la corriente de absorción total.

$$i_a = \Delta VCD \sum_{k=1}^m [t + (1 - k)N]^{-n} \quad (2.10)$$

En que:

- k = Orden del escalón del voltaje considerado
 t = Tiempo total transcurrido desde el comienzo del ensayo
 N = Intervalo de tiempo constante entre escalones sucesivos

Si los incrementos de voltaje de cada escalón son diferentes, la expresión anterior se modifica de acuerdo a:

$$i_a = CD \sum_{k=1}^m \Delta V_k [t + (1 - k)N]^{-n} \quad (2.11)$$

2.3.5. Determinación de la corriente de conducción en ensayo de voltaje continuo

Una forma posible de determinación de la corriente de conducción con un ensayo de aplicación de un voltaje constante, sería esperar un tiempo suficientemente como para que la corriente de absorción haya desaparecido. Sin embargo este tiempo de anulación de la corriente de absorción puede ser muy grande, del orden de varias horas. En muchas ocasiones interesa obtener la corriente de conducción para varios valores del voltaje aplicado, con lo cual el tiempo requerido en los ensayos se hace inaceptablemente largo.

Schleif, Johnson y Swiener proponen un método para determinar la corriente de conducción que requiere de un tiempo sensiblemente menor que el mencionado anteriormente. Este método consiste en aplicar a la aislación un escalón de tensión continua y medir y medir la corriente total para tres tiempos dimensionados en progresión geométrica, por ejemplo 1 minuto, 3,16 minutos y 10 minutos.

Para tiempos de este orden de magnitud, la corriente capacitiva i_g ya ha desaparecido, por lo cual la corriente total i_t será igual a la suma de la corriente de conducción i_c más la de absorción i_a .

Sean t_1 , λt_1 y $\lambda^2 t_1$ los tiempos de medida que se hallan en progresión geométrica. Por lo tanto las corrientes totales serán:

$$\begin{aligned} i_1 &= i_t(t_1) = i_c + A t_1^{-n} \\ i_2 &= i_t(\lambda t_1) = i_c + A \lambda^{-n} t_1^{-n} \\ i_3 &= i_t(\lambda^2 t_1) = i_c + A \lambda^{-2n} t_1^{-n} \end{aligned} \quad (2.12)$$

De donde se deduce:

$$i_c = \frac{i_1 \cdot i_3 - i_2^2}{i_1 + i_3 - 2i_2} \quad (2.13)$$

De este modo es posible determinar la corriente de conducción a partir de la medida de la corriente total correspondiente a tres tiempos del orden de los minutos.

2.4. Resistencia de aislación

Una de las medidas más usuales y que data de hace muchísimos años, es la medida de la resistencia de aislación de los equipos de A.T. Esta resistencia de aislación es una resistencia aparente, medida después de un tiempo determinado de estar aplicada una tensión continua constante. Normalmente se mide al minuto de haberse aplicado la tensión. Se usa como indicativa del estado de la aislación en servicio para prevenir su ruptura dieléctrica (mantención preventiva).

Esta medida es no-destructiva. En general la resistencia de aislación decrece con el aumento de tamaño del equipo eléctrico y aumenta con el nivel de aislación del mismo (aumento de tensión nominal).

La resistencia de aislación es una medida cuantitativa, más bien comparativa en un mismo equipo y es influenciada por la humedad, suciedad y deterioro. La tendencia actual es reemplazar la medida de resistencia de aislación por otras más significativas como por ejemplo la medida de $tg(\delta)$. Sin embargo la medida de resistencia de aislación se sigue utilizando como método simple y rápido de detectar fallas francas en una aislación.

La resistencia de aislación depende de la resistividad superficial y de la resistencia volumétrica de los materiales que constituyen la aislación.

2.4.1. Resistiva superficial (ρ_s)

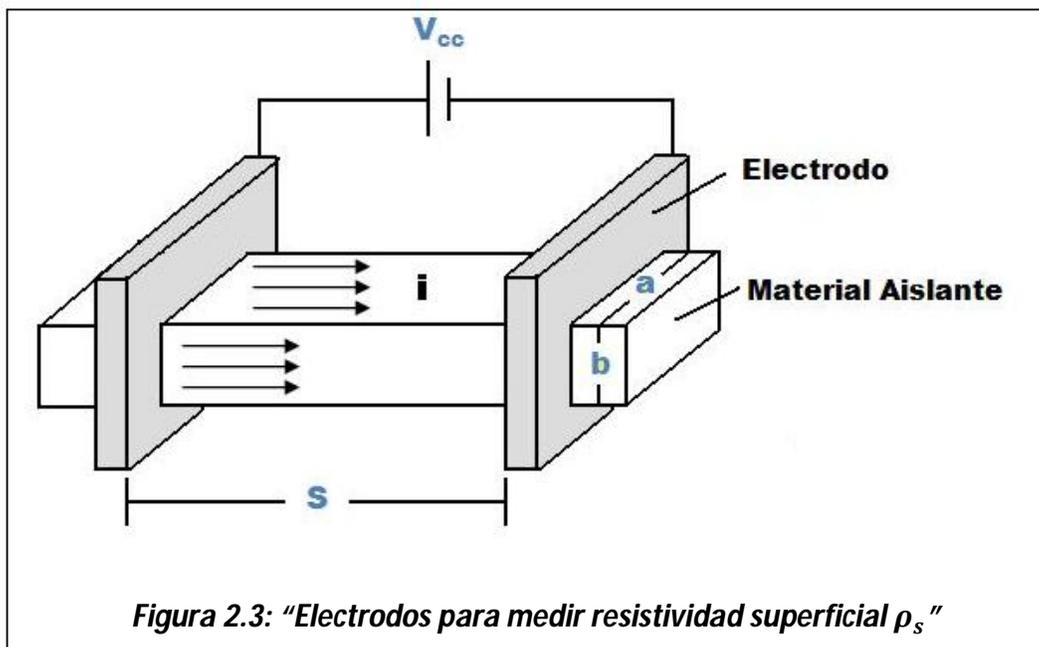
La resistividad superficial ρ_s de un material, es el cociente entre el gradiente de tensión paralelo a la corriente a lo largo de la superficie medida y la corriente por unidad de ancho de esta superficie. Ver figura 2.3.

$$\rho_s = \frac{V_{cc}p}{i_s s} = \frac{R_s p}{s} \quad (2.14)$$

ρ_s = Resistividad superficial [Ω]
 p = $2(a + b)$ = perímetro de los electrodos

Parámetros que influyen en la medida de ρ_s :

- humedad de la superficie
- rugosidad de la superficie
- forma de los electrodos
- voltaje y tiempo de aplicación
- temperatura de la superficie



2.4.2. Resistividad volumétrica (ρ_v)

La resistividad volumétrica de un material aislante, es el cociente entre el gradiente de potencial paralelo a la corriente del material, y la densidad de corriente.

$$\rho_v = \frac{A}{s} R_v \quad (2.15)$$

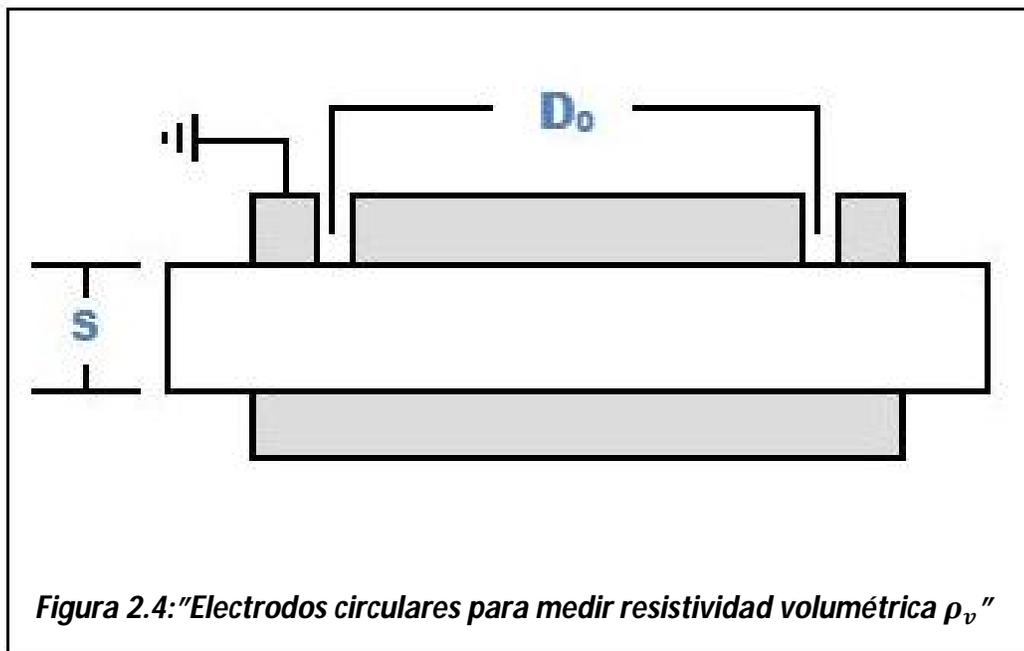
- ρ_v = Resistividad volumétrica [Ωcm]
- R_v = Resistencia volumétrica en Ω para un tiempo determinado
- s = Espesor promedio del espécimen [cm]
- A = Área efectiva para un arreglo particular de electrodos (cm^2)

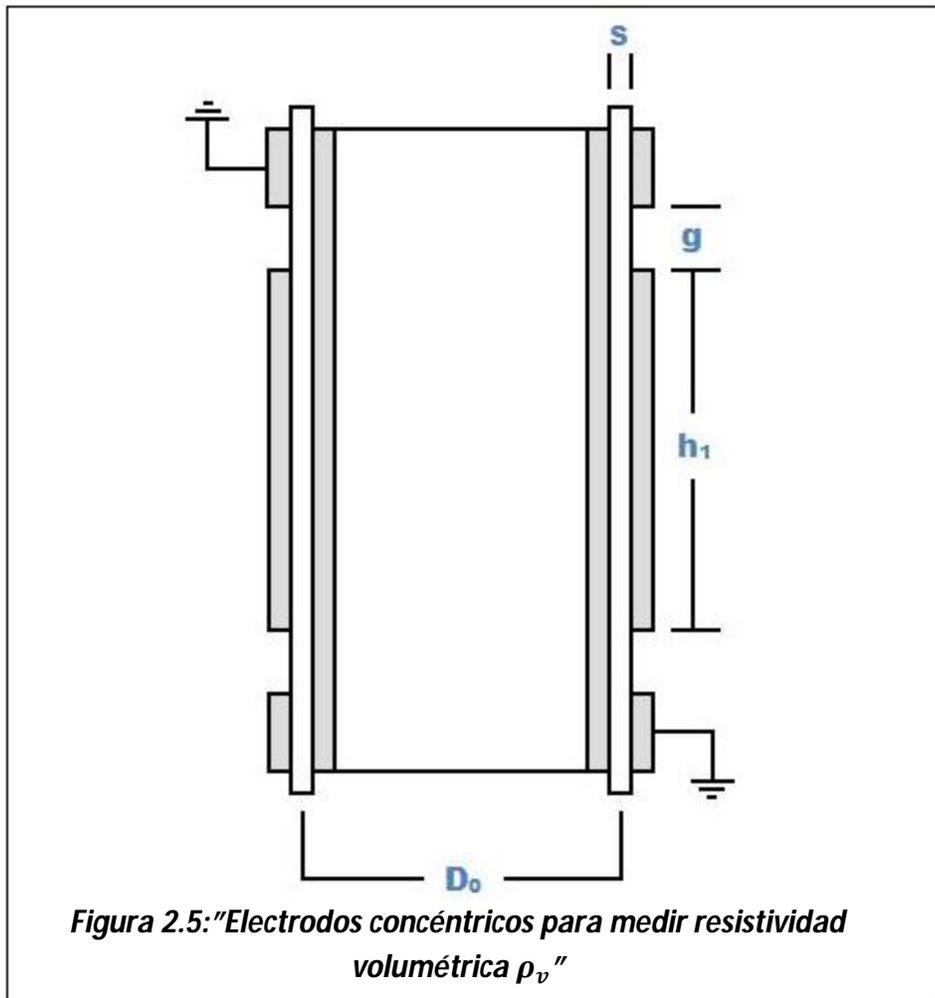
Para electrodos circulares (Ver figura 2.4)

$$A = \frac{\pi}{4} D_o^2$$

Para electrodos concéntricos (Ver figura 2.5)

$$A = \pi D_o (h_1 + g)$$





$$\rho_v = 11.3 C_o R_v \text{ } [\Omega cm]$$

C_o = Capacidad de los electrodos pF, con dieléctrico aire (vacío)
 R_v = Resistencia de aislación volumétrica en $[\Omega]$

Parámetros que influyen en la medida de ρ_v :

- espesor de la muestra
- humedad de la muestra
- temperatura de la muestra
- voltaje y tiempo de aplicación

2.4.3. Factores que afectan el valor de la resistencia de aislación.

2.4.3.1. Efectos del estado de la superficie.

La resistividad superficial ρ_s de un material depende principalmente de sustancias extrañas, como por ejemplo aceite y/o polvo de carbón sobre la superficie exterior. Esto puede generar una corriente superficial de fuga significativamente alta en máquinas de corriente continua y grandes rotores de generadores, los cuales tienen una mayor superficie de fuga. También puede disminuir la resistividad superficial de la aislación en máquinas que tienen sistemas de control de voltaje en los terminales de la bobina.

Por otro lado, polvo o sales sobre la superficie de una aislación, las cuales son normalmente no conductoras cuando están secas, puede llegar a ser parcialmente conductoras cuando son expuestas a la humedad o aceite, y, de este modo, aumentar la corriente de conducción. El efecto que tienen estas sustancias extrañas sobre el valor de la resistencia de aislación, y por lo tanto sobre el DAR y el IP, puede ser normalmente mejorado a un valor aceptable mediante una limpieza y secado de la superficie de la aislación.

2.4.3.2. Efectos de la humedad

A pesar de de que se encuentre limpia la superficie de una aislación, si la temperatura de la aislación está debajo del punto de condensación del aire, una capa de humedad se podría formar en la superficie, la cual puede aumentar la corriente de fuga y disminuir la resistividad superficial ρ_s . El efecto es más notorio si la superficie además está contaminada, o si existen grietas en la aislación. Hay que notar que los efectos de la humedad en una aislación sana no deberían ser excluyentes en la obtención de lecturas aceptables.

Algunos tipos de antiguas aislaciones son higroscópicas (facilidad de absorber agua) y la humedad puede introducirse al cuerpo de la aislación desde el ambiente aéreo húmedo. La absorción de humedad aumenta la corriente de conducción y baja significativamente la resistencia de aislación.

Las aislaciones de equipos en servicio están normalmente sobre la temperatura de condensación del aire, por lo cual al realizar el test sobre una máquina o conductor que ha estado en servicio, este test debería realizarse antes que la temperatura del equipo sea menor a la del punto de condensación.

Máquinas y conductores fuera de servicio son frecuentemente testeados cuando su temperatura está debajo del punto de condensación, por lo cual se pueden obtener valores de resistencias de aislación e índices de polarización significativamente más bajos a los esperados. Esto hace necesario secar primeramente los equipos para obtener lecturas aceptables. El historial de la máquina, inspecciones visuales, y otros test podrían ayudar a evaluar el riesgo potencial de volver a servicio una máquina con baja resistencia de aislación y/o índice de polarización debido a la humedad.

2.4.3.3. Efectos de la temperatura.

El efecto de la temperatura sobre la resistividad de un material, dependerá si éste es metálico o no. En metales, donde hay numerosos electrones libres, un aumento de temperatura genera una agitación térmica más alta, lo cual reduce el camino libre promedio del movimiento del electrón con una consecuente reducción de la movilidad, lo que se traduce en un aumento en la resistencia. Sin embargo, en aislaciones, un aumento en la temperatura proporciona energía térmica, la cual adiciona portadores libres y reduce la resistividad.

La variación de temperatura afecta a todas las componentes de la corriente total identificadas, excepto la corriente capacitiva geométrica. El valor de la resistencia de aislación de un equipo depende de la temperatura a la cual se encuentre la aislación y del tiempo transcurrido desde la aplicación del voltaje. Generalmente la diferencia de temperatura en un equipo que está siendo analizado entre 1 minuto y 10 minutos de aplicado el voltaje es insignificante. Para evitar el efecto de la temperatura, en un análisis de tendencia, el siguiente test debería ser llevado a cabo cuando la aislación se encuentre a una temperatura cercana a la del test anterior. Sin embargo, si la temperatura de la aislación no puede ser controlada desde un test al otro, se recomienda que los valores del test de aislación sean corregidos a una base común de temperatura de 40 °C usando la ecuación 2. Aunque el valor corregido sea una aproximación, esto permite una mejor comparación de los valores de resistencia de aislación a diferentes temperaturas.

La corrección se hace de la siguiente manera:

$$R_C = R_T \cdot K_T \quad (2.16)$$

En que:

R_C = Resistencia de aislación [$M\Omega$] corregida a 40 °C.

K_T = Coeficiente de temperatura de la resistencia de aislación a temperatura T °C.

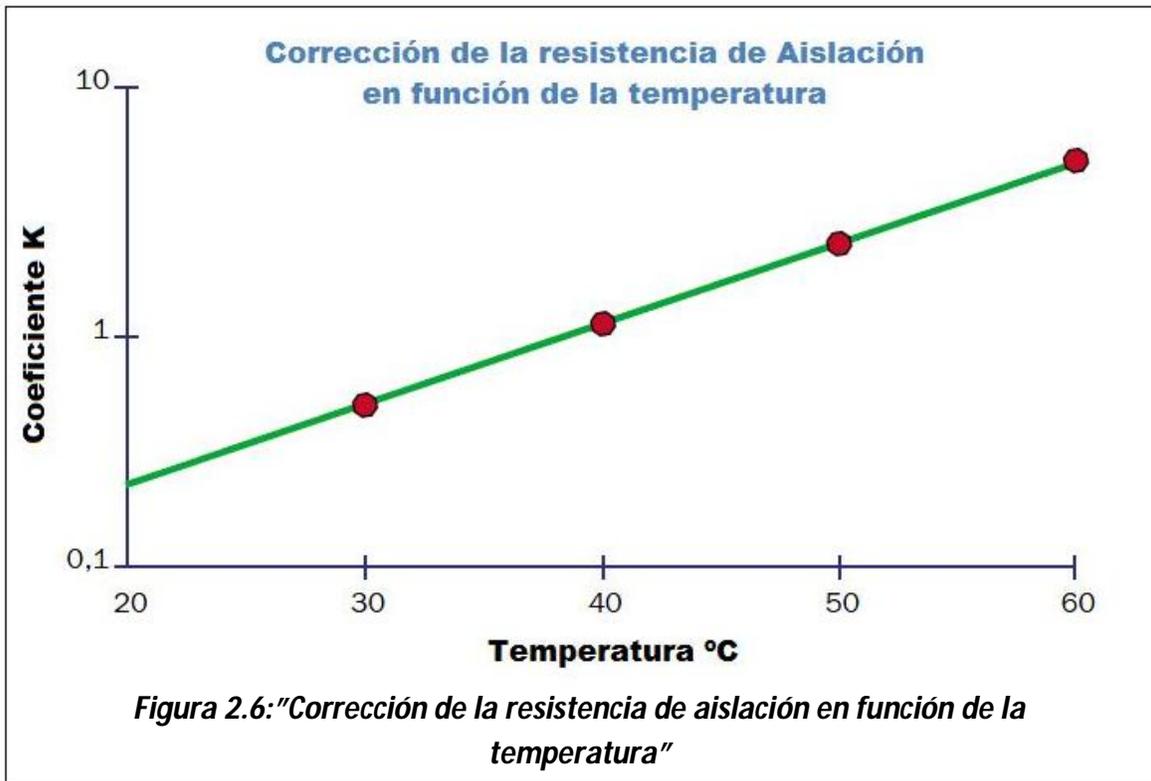
R_T = Medida de la resistencia de aislación [$M\Omega$] a la temperatura T °C.

Para temperaturas debajo del punto de condensación, es difícil predecir el efecto de la condensación de la humedad en la superficie, por lo tanto intentar corregir a 40 °C para un análisis de tendencia introduciría errores inaceptables. En aquellos casos, es recomendado que el historial de la aislación testeada bajo similares condiciones sea el factor predominante para determinar apropiadamente el retorno del equipo a servicio. Sin embargo, para lecturas de resistencia de aislación y/o índice de polarización con contaminación de humedad normalmente baja, es posible corregir a 40 °C para comparar con el criterio de aceptación.

No existe una manera efectiva para convertir la resistencia de aislación medida a una específica humedad a una resistencia de aislación que se mediría a una humedad diferente.

2.4.3.3.1. Método para determinar K_T

El método recomendado para determinar K_T es obtener datos de la curva de resistencia de aislación versus la temperatura de la aislación, todas sobre el punto de condensación, y graficar los resultados en una escala semi-logarítmica. Cuando se usa una escala logarítmica para la resistencia de aislación y una escala lineal para la temperatura, los puntos de las pruebas deberían aproximarse a una línea recta, que puede ser extrapolada para obtener el valor correcto a 40 °C. Ver figura 2.6.



2.4.3.4. Efectos de la magnitud del voltaje continuo aplicado

Los valores recomendados para el test de voltaje continuo sobre una máquina rotatoria son presentados en la tabla 2.1 [3]. El valor de la resistencia de aislación podría disminuir un tanto con el aumento del voltaje aplicado; sin embargo, para una aislación en buenas condiciones y rigurosamente seca, se obtendría casi el mismo valor de resistencia de aislación para voltajes superiores al máximo recomendado [2].

Tabla 2.1: Valores de voltaje recomendados para el test de resistencia de aislación

Voltaje nominal de la bobina [V]	Voltaje del test de R. A. [V]
< 1000	500
1000 - 2500	500 - 1000
2501 - 5000	1000 - 2500
5001 - 12 000	2500 - 5000
> 12 000	5000 - 10 000

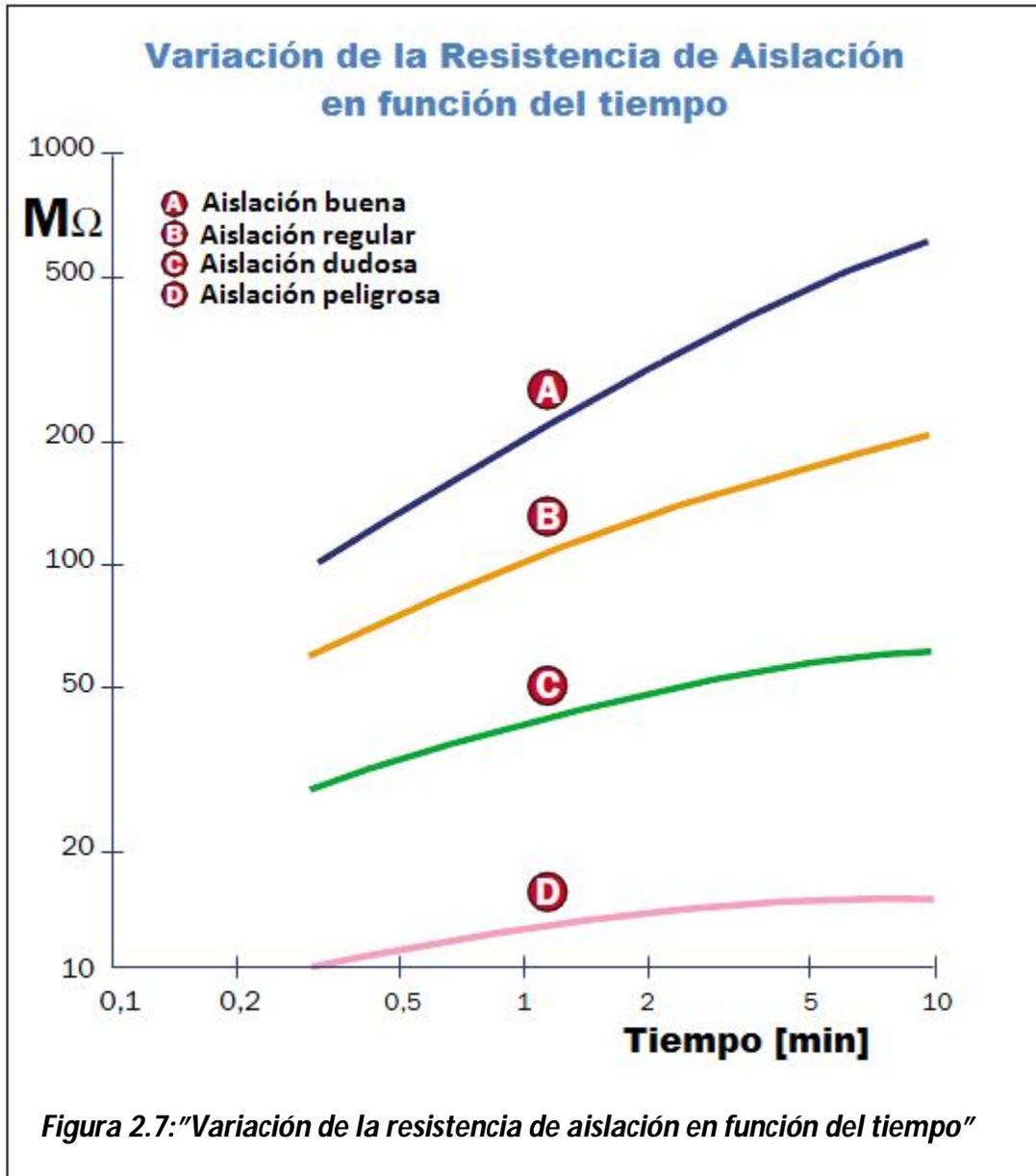
Una disminución considerable en la resistencia de aislación debido a un aumento en el voltaje aplicado podría indicar problemas de aislación. Estos problemas podrían ser debido a imperfecciones o fracturas en la aislación, agravadas por suciedad o humedad; o los problemas podrían solamente ser debido a efectos de suciedad y/o humedad o resultados de otros fenómenos de deterioro. El cambio en la resistencia es más pronunciado a voltajes considerablemente más alto al recomendado.

2.4.4. Disminución de la resistencia de aislación

La resistencia de aislación puede disminuir su valor a través de los años, esto debido a que además de las tres categorías principales de sollicitaciones (dieléctricas, mecánicas y térmicas) que debe soportar la aislación, se deben considerar otras influencias que son importantes en el comportamiento de los materiales aislantes en servicio, tales como; acción física y química de los contaminantes industriales, acción de la humedad y del oxígeno atmosférico, acción de organismos vivos (bacterias, insectos, ratas), etc.

Es importante que al realizar este test se guarde un historial sobre el valor de la resistencia de aislación del equipo, pues la comparación de los resultados del test presente con los anteriores aportará mucho sobre el estado de la aislación. Sin embargo, se debe tener la precaución de comparar los test bajo condiciones similares, tales como, temperatura de la aislación, magnitud de voltaje, duración de voltaje, y humedad relativa.

Una caída brusca del valor de la resistencia de aislación comparada con valores anteriores puede indicar contaminación en la superficie, humedad, o daños severos en la aislación. (Ver figura 2.7).



2.4.5. Valores mínimos de resistencia de aislación

2.4.5.1. Máquinas rotatorias

La norma AIEE N° 43 del año 1950: "Recommended Practice for Testing Insulation Resistance of Rotating Machinery" da una fórmula que permite determinar, en forma aproximada, la resistencia de aislación mínima aceptable para los enrollados del estator de una máquina de C.A. de 1000 kVA nominales o más.

Es de hacer notar que los valores obtenidos mediante esta fórmula corresponden al conjunto formado por los tres enrollados y son valores mínimos antes de someter la máquina a trabajar en condiciones normales con valores de aislación 10 veces menores. La fórmula es la siguiente:

$$RA = k_a \cdot k_t \frac{(kV+3.6) \cdot (8+\sqrt{r.p.m.})}{\sqrt{kVA}-16} \quad (2.17)$$

En que:

- RA = Resistencia de aislación del enrollado del estator a 20 °C en $M\Omega$, obtenida aplicando 500 Volts de C.C. durante 1 minuto,
- k_a = Coeficiente de aislación de los enrollados
2.5 para enrollados con aislación clase A
7.0 para enrollados con aislación clase B,
- k_t = Coeficiente de temperatura de la resistencia de aislación de los enrollados
1.0 para una temperatura de los enrollados de 20 °C,
- kV = Tensión nominal de kV de la máquina, entre fases,
- $r.p.m.$ = velocidad de la máquina en revoluciones por minuto,
- kVA = Capacidad nominal de la máquina en kilo-volts-ampères.

La norma IEEE N° 43 del año 2000 "Recommended Practice for Testing Insulation Resistance of Rotating Machinery" [3] recomienda los valores mínimos de resistencia de aislación presentados en la tabla 2.2. Estos valores de resistencia de aislación corresponden a los medidos entre las tres fases de la bobina de armadura testeada con respecto a tierra.

Tabla 2.2: Valores mínimos recomendados de resistencia de aislación para máquinas rotatorias

Voltaje mínimo de R. A. [$M\Omega$]	Tipo de máquina rotatoria
IR 1 min = $kV + 1$	Para bobina construidas antes de 1970 y las no descritas abajo
IR 1 min = 100	Para la mayoría de las bobinas construidas después de 1970
IR 1 min = 5	Para la mayoría de las máquinas con estator bobinado menores de 1 kV

2.4.5.2. Cables

La resistencia de aislación de los cables de A.T. presenta una gran variación debido a la diversidad de materiales aislantes usados, intensidad de campo máximo usada en el cálculo del espesor de su aislación y largo de los circuitos de medida incluyendo el cable, el cual puede tener variación de temperatura en su extensión.

Un cable unipolar nuevo, antes de ser sometido a las pruebas de voltaje aplicado en C.A. y basado en la aplicación de 500 Volts C.C., por un minuto a una temperatura de 60 °F (15.6 °C), debe tener un valor mínimo de resistencia de aislación dado por la relación siguiente:

$$RA = k_a \cdot \log \frac{D}{d} \quad (2.18)$$

RA	=	Resistencia de aislación en $M\Omega$ por 1000 pies de cable
k_a	=	Constante de aislación del cable,
D	=	Diámetro externo de la aislación del conductor,
d	=	Diámetro del conductor.

Algunos valores mínimos de k_a para distintos tipos de aislación:

Papel impregnado	2640	
Tela Cambric barnizada	2640	(2.19)
Polietileno	50000	

2.4.6. Medidas de la corriente de absorción y valores tentativos del DAR y el IP para diagnosticar el estado de una aislación.

De acuerdo con lo estudiado en el punto 2.3.2 una manera de apreciar la magnitud de la corriente de absorción, en forma relativa a la corriente de conducción, es medir la corriente total que circula por un dieléctrico a los 30 segundos y al minuto (DAR), o al minuto y a los 10 minutos (IP).

$$IP = \text{Índice de polarización} = \frac{(i_a+i_c)_{1 \text{ minuto}}}{(i_a+i_c)_{10 \text{ minutos}}} = \frac{RA_{10m}}{RA_{1m}} \quad (2.7)$$

$$DAR = \text{Razón de Absorción Dieléctrica} = \frac{(i_a+i_c)_{30 \text{ segundos}}}{(i_a+i_c)_{1 \text{ minuto}}} = \frac{RA_{1m}}{RA_{30s}} \quad (2.8)$$

El valor de estas relaciones nos dan una indicación bastante clara del grado de humedad y limpieza de una aislación, pues si la aislación está contaminada o mojada, la corriente total (i_t) será aproximadamente constante con el tiempo, esto debido a que la corriente de conducción i_c y/o la corriente capacitiva geométrica i_g serán mucho más altas y más considerables que la corriente de absorción i_a . Si una aislación está limpia y seca, la corriente total i_t decrecerá normalmente con el tiempo, esto debido a que la corriente total será principalmente debido a la corriente de absorción.

Valores tentativos generales del índice de polarización y razón de absorción dieléctrica que se proponen para diagnosticar el estado de una aislación se muestran en la tabla N° 2.3 [3], [4].

Tabla 2.3: Valores tentativos del DAR y el IP para diagnosticar el estado de una aislación

Condiciones de una Aislación			
	DAR	IP	
Peligroso	< 1	< 1	1
Pobre	< 1.1	< 1.5	2
Dudoso	1.1 a 1.25	1.5 a 2	3
Regular	1.25 a 1.4	2 a 3	4
Bueno	1.4 a 1.6	3 a 4	5
Excelente	> 1.6	> 4	6

A cada estado de una aislación se le asigna un número para poder hacer un análisis de dispersión con los datos obtenidos.

Estos valores pueden variar para distintas temperaturas de la aislación, diferentes clases de aislación y diferentes equipos, puesto que existen equipos que tienen mayores superficies de fuga, como por ejemplo las máquinas rotatorias. Debido a esto, además del valor de éstas razones obtenidas en el test para diagnosticar el estado de la aislación, es importante comparar los resultados con los test realizados anteriormente al equipo (historial del equipo).

En el caso particular de este informe, por no existir historial de los equipos analizados, se usa la tabla propuesta como la única forma para diagnosticar el estado de una aislación.

3. TRABAJO EXPERIMENTAL

La segunda parte de este trabajo de título contempla la realización de mediciones de resistencia de aislación sobre 4 distintas aislaciones en el laboratorio de alta tensión del DIE y en el laboratorio de Nexans S.A. Las medidas realizadas en el laboratorio de alta tensión del DIE fueron sobre una bobina de generador de 13,8 kV y un conductor de un metro de largo, calibre 7 AWG y aislación de goma. Las medidas realizadas en el laboratorio de Nexans S.A. fueron sobre una placa de aislación circular tipo XLPE de 0.7 milímetros de espesor y 8,5 centímetros de diámetro, y un conductor de 15 metros de largo, aislación tipo XLPE y calibre 16 AWG.

En el apartado que sigue se analiza el circuito de medición y en los subsiguientes se analizan las experiencias para los distintos equipos nombrados.

3.1. Elementos constituyentes de las experiencias

Con respecto a las mediciones que se realizaron en el laboratorio de alta tensión del DIE, se midió la resistencia de aislación en función del tiempo de una bobina de generador de 13,8 kV y un conductor de un metro de largo, calibre 7 AWG y aislación de goma. Para ambos casos se simuló una situación de "falla". En el primer caso la bobina presentaba una falla franca, y mediante papel de aluminio (conductor) se representó distintas dimensiones de esta falla. En el caso del conductor se adelgazó la aislación simulando una falla debido a un arrastre del conductor.

En el laboratorio de Nexans S. A., las medidas de resistencia de aislación en función del tiempo, se realizaron sobre una placa de aislación circular tipo XLPE de 0.7 milímetros de espesor y 8,5 centímetros de diámetro, y un conductor de 15 metros de largo, aislación tipo XLPE y calibre 16 AWG. En ambos casos las mediciones se realizaron a temperaturas mayores a la del medio ambiente y se envejecieron térmicamente en un horno.

Se utilizaron varios elementos para concretar las medidas, tales como:

- Meghómetro marca AEMC
- Meghómetro marca BM25
- Celda de electrodos marca Tettex
- Regulador de temperatura marca Tettex
- Horno de envejecimiento térmico marca PS
- Calentador de agua marca Stuart Scientific
- Bobina de prueba
- Conductor preparado, calibre 7 AWG
- Placa de aislación XLPE
- Conductor de 15 metros de largo

En el circuito de prueba para calcular la resistencia de aislación se usó el terminal de guarda G equipado en los megóímetros. El propósito de este terminal es dar la posibilidad de efectuar la llamada "medida con tres terminales", es decir, poder determinar directamente la resistencia de un solo camino de fuga de entre dos que se hallan en paralelo. También tiene un propósito secundario, el de proveer una fuente de tensión continua de buena regulación y de limitada corriente capacitiva. Normalmente este terminal de guarda se usa para no medir la corriente de fuga superficial, y por lo tanto, medir solamente la volumétrica de la aislación.

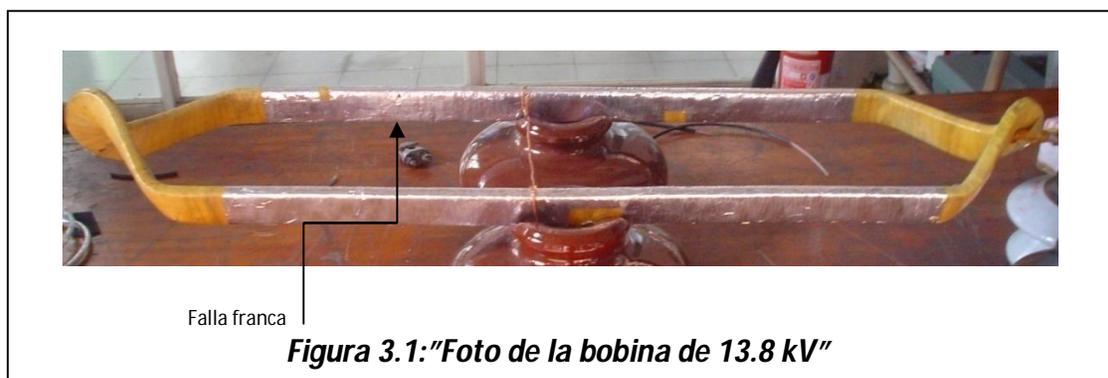
3.2. Experiencias

En este apartado se explica en detalle cada una de las cuatro experiencias realizadas en los laboratorios. Primero las realizadas en el laboratorio de alta tensión del DIE, y luego las experiencias realizadas en el laboratorio de Nexans S. A.

Cabe destacar, que las medidas de resistencia de aislación se obtuvieron aplicando un voltaje continuo de 250 V, 500 V y 1000 V sobre las aislaciones de las experiencias 1 y 2, un voltaje en torno a 1000 V para la experiencia 3 y un voltaje de 500 V en la cuarta y última experiencia. En todas las experiencias el tiempo de aplicación del voltaje fue de 10 minutos, registrando los valores de la resistencia de aislación a los 30 segundos, al minuto, 3,10 minutos y finalmente a los 10 minutos.

3.2.1. Experiencia 1: Medidas de resistencia de aislación en una bobina preformada de 13,8 [kV]

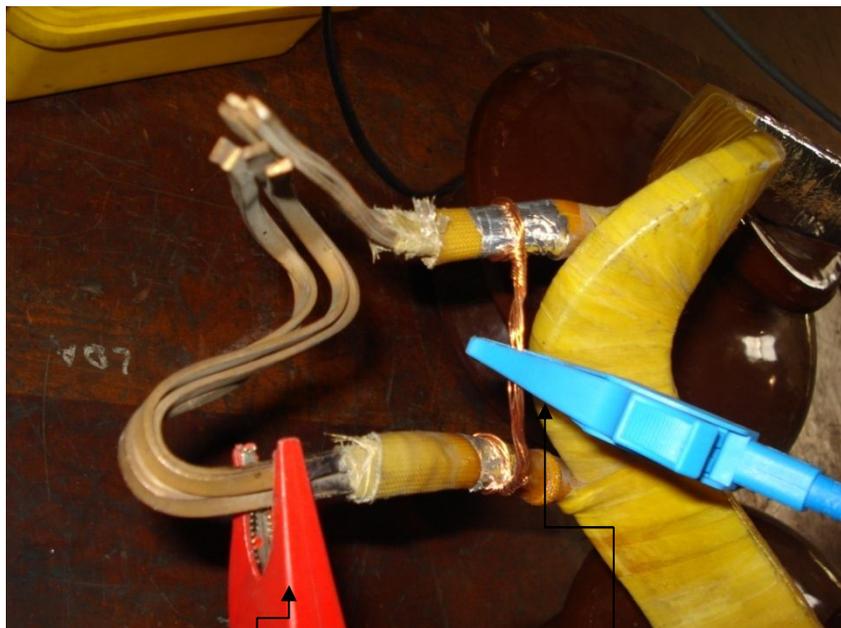
La primera experiencia realizada, consistió en medir la resistencia de aislación de una bobina preformada de 13,8 kV nominales aislada con una cinta de fibra de vidrio [5]. La bobina presentaba una falla franca (ver figura 3.1). Se envolvió con cinta conductora de aluminio la zona recta, se conectó un puente con un alambre entre ambas zonas rectas para así conectar el terminal negativo del megómetro y poder medir el valor de la resistencia de aislación. Tal como muestra la figura 3.2.





Terminal negativo

Meghómetro



Terminal positivo

Conductor de guarda

Figura 3.2: "fotos de las conexiones a la bobina de 13.8 kV"

En la bobina de generador se simularon cuatro fallas francas distintas. Ver figura 3.3. Esto se logró añadiéndole cinta conductora de aluminio al contorno de la falla franca, disminuyendo, de esta manera, la distancia entre el conductor de cobre de la bobina y la cinta conductora de papel de aluminio. Esta cinta conductora de aluminio es la que

finalmente conduce la corriente total que fluye a través de la aislación hacia el terminal del megómetro.



Los resultados y los gráficos correspondientes para las cuatro fallas distintas son los siguientes:

Tabla 3.1: Valores de la resistencia de aislación para la bobina

1ª falla				
Voltaje	250 V	500 V	1000 V	
R30	70.4	68.3	50.4	GΩ
R1	120.3	115.8	83.1	GΩ
R3,10	264.4	216.6	150.4	GΩ
R10	468	426.5	285.5	GΩ
2ª falla				
Voltaje	250 V	500 V	1000 V	
R30	52.6	48.7	38.5	GΩ
R1	85.3	76.9	59.7	GΩ
R3,10	209.7	153.5	124.1	GΩ
R10	283.7	239.5	182	GΩ
3ª falla				
Voltaje	250 V	500 V	1000 V	
R30	47.1	43.2	35.1	GΩ
R1	68.6	60.9	46.33	GΩ
R3,10	154.7	91.7	69.4	GΩ
R10	176.3	141.5	99.2	GΩ
4ª falla				
Voltaje	250 V	500 V	1000 V	
R30	36.3	38.2	28.1	GΩ
R1	45.9	43.6	29.7	GΩ
R3,10	56.2	61.1	34.2	GΩ
R10	96.3	80.2	42.4	GΩ

Tabla 3.2: Valores y diagnóstico del DAR y el IP para la bobina

1ª falla				
Voltaje [V]	DAR	IP	Diagnóstico DAR	Diagnóstico IP
250	1.71	3.89	Excelente - 6	Bueno - 5
500	1.7	3.68	Excelente - 6	Bueno - 5
1000	1.65	3.44	Excelente - 6	Bueno - 5
2ª falla				
250	1.62	3.33	Excelente - 6	Bueno - 5
500	1.58	3.11	Bueno - 5	Bueno - 5
1000	1.55	3.05	Bueno - 5	Bueno - 5
3ª falla				
250	1.46	2.57	Bueno - 5	Regular - 4
500	1.41	2.32	Bueno - 5	Regular - 4
1000	1.32	2.14	Regular - 4	Regular - 4
4ª falla				
250	1.26	2.1	Regular - 4	Regular - 4
500	1.14	1.84	Dudoso - 3	Dudoso - 3
1000	1.06	1.43	Pobre - 2	Pobre - 2

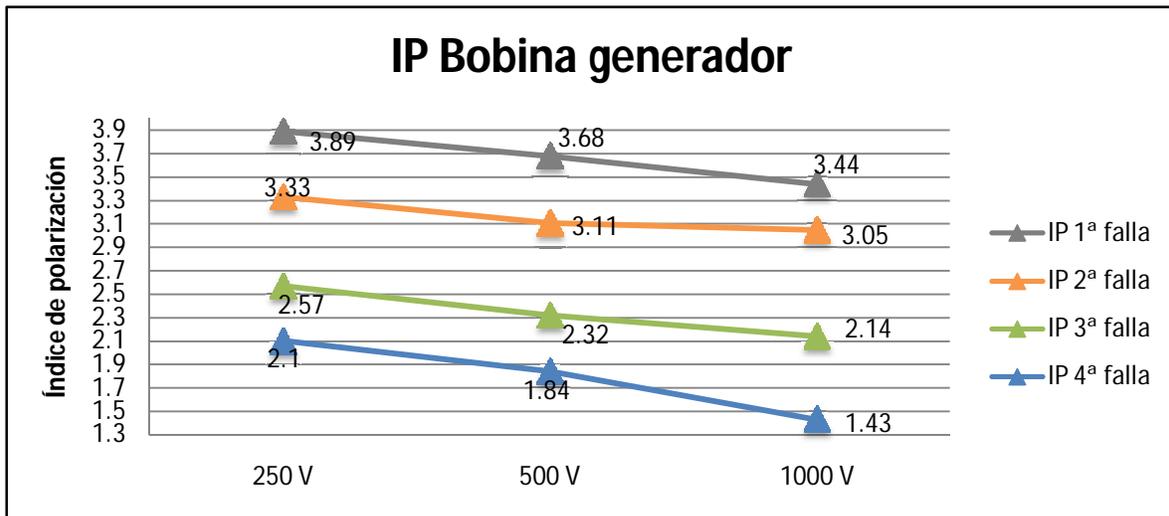


Figura 3.3: "Gráfico del índice de polarización de la bobina para las 4 fallas"

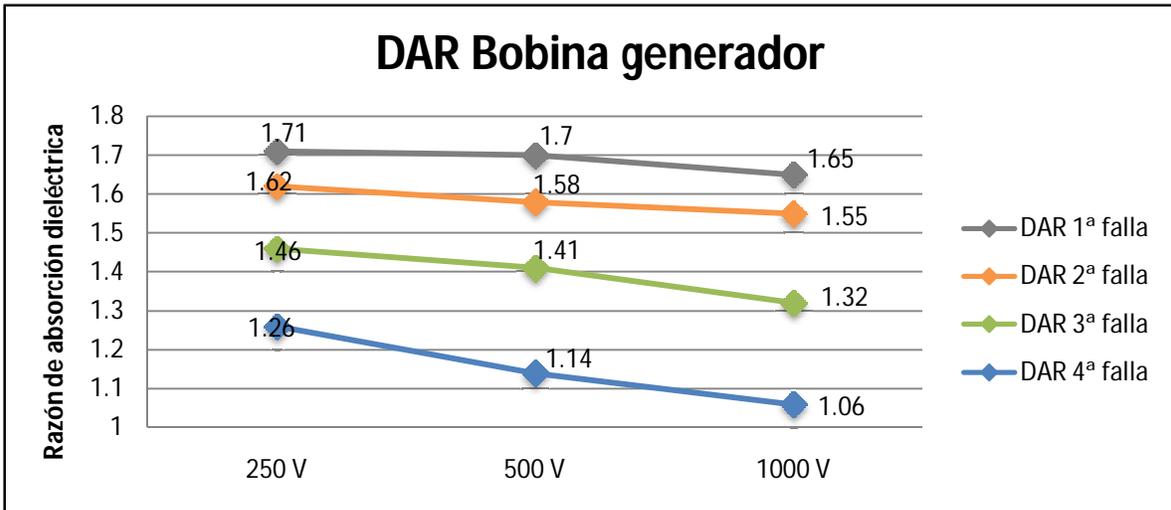


Figura 3.4: "Gráfico de la razón de absorción dieléctrica de la bobina para las 4 fallas"

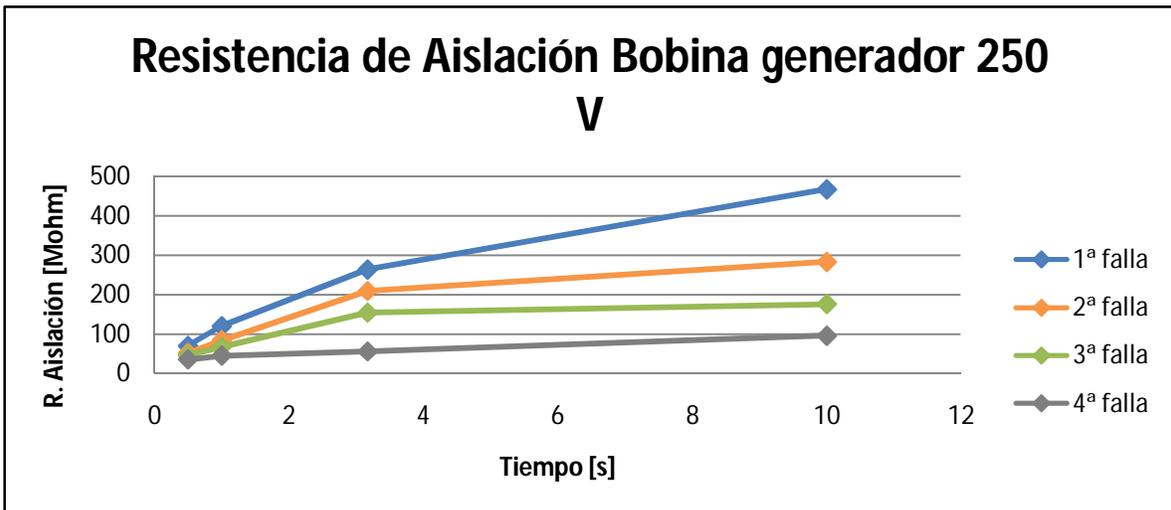


Figura 3.5: "Gráfico de la resistencia de aislación en función del tiempo a 250 V"

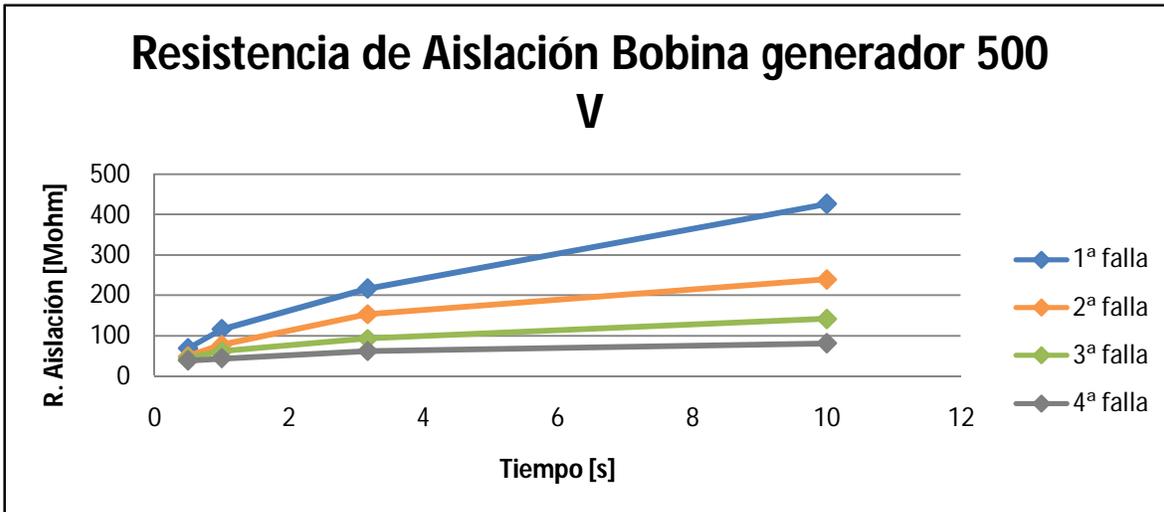


Figura 3.6: "Gráfico de la resistencia de aislación en función del tiempo a 500 V"

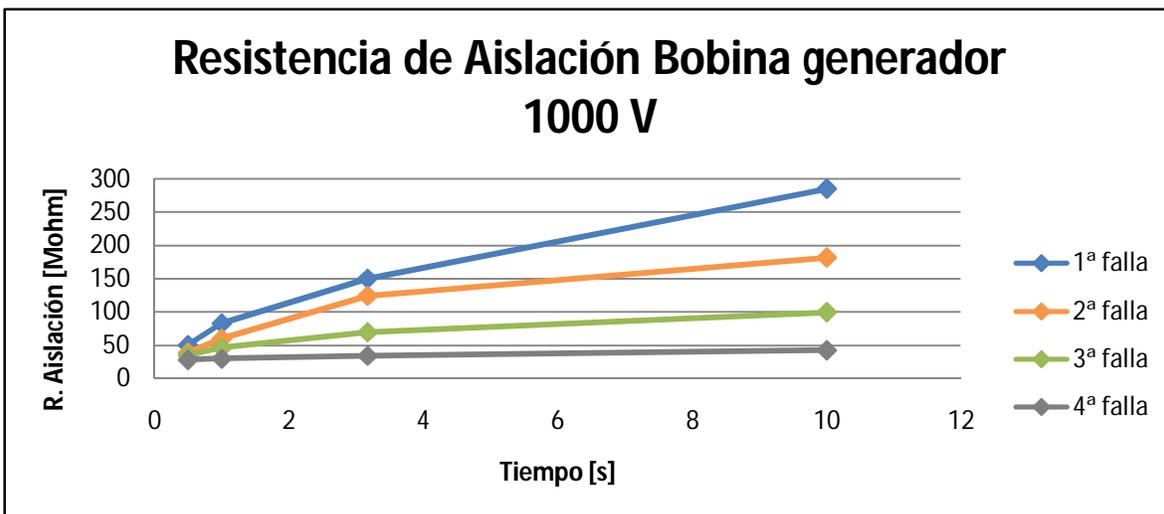


Figura 3.7: "Gráfico de la resistencia de aislación en función del tiempo a 1000 V"

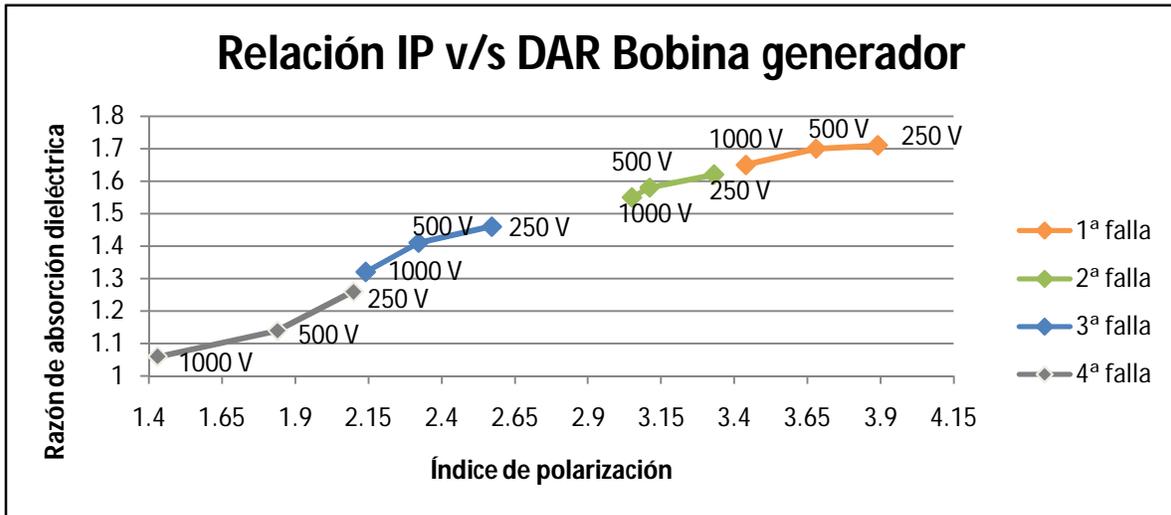


Figura 3.8: "Gráfico de la relación entre el IP y el DAR para la bobina"

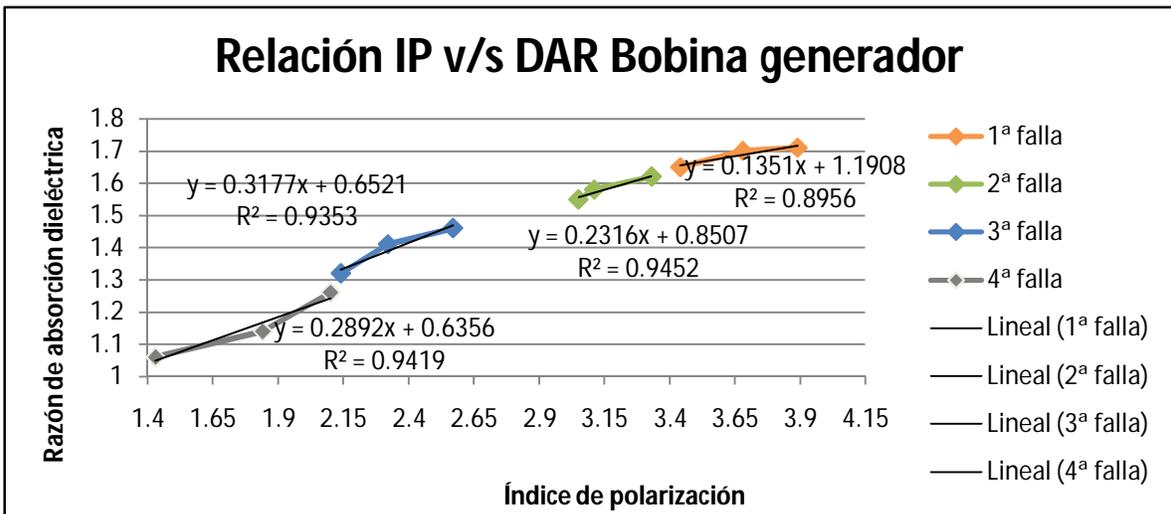


Figura 3.9: "Gráfico de las rectas representativas de la relación entre el IP y el DAR para la bobina"

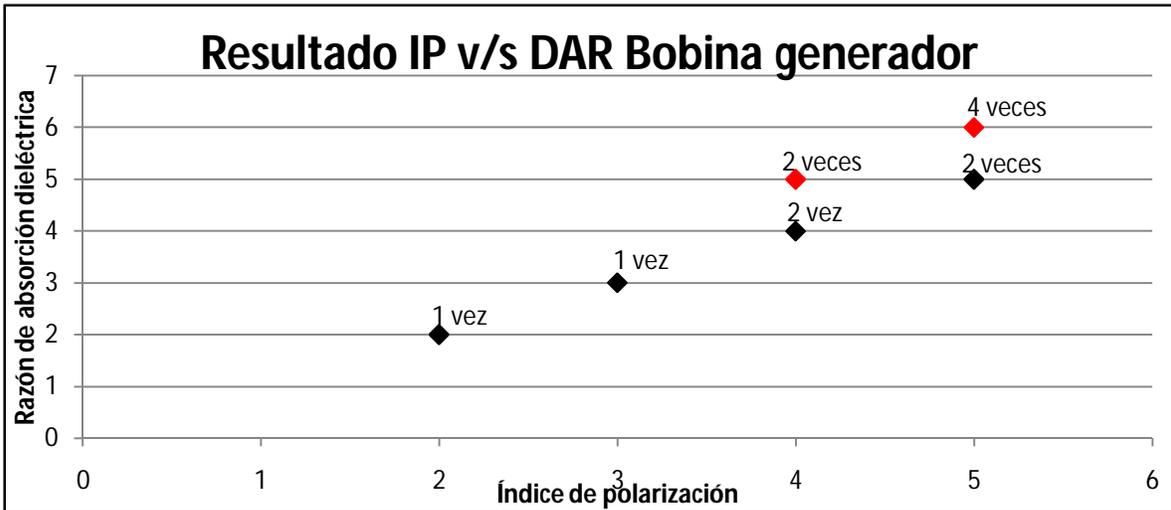


Figura 3.10: " Gráfico de dispersión de las razones DAR y IP para la bobina"

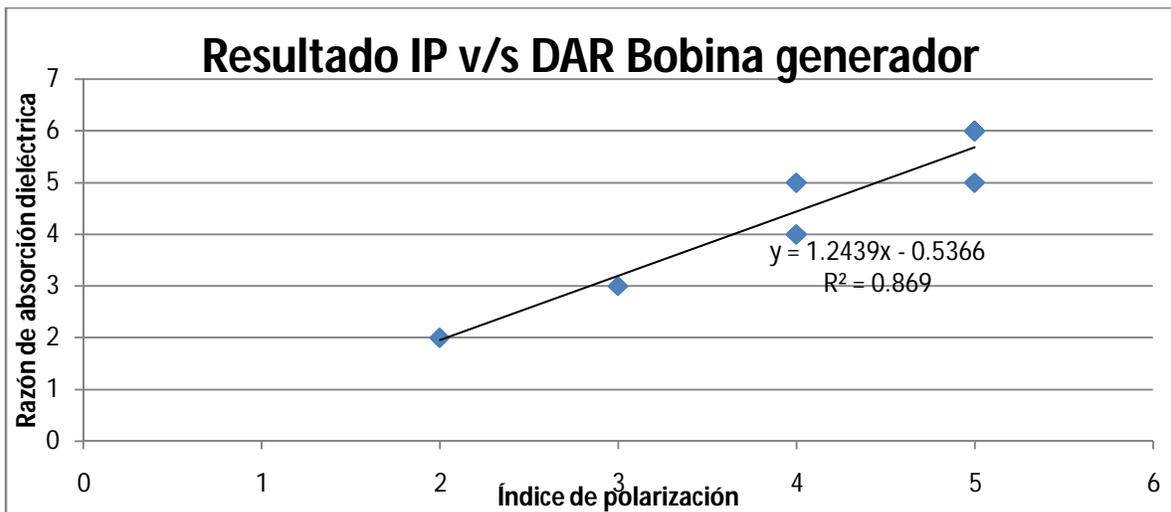


Figura 3.11: " Gráfico de la recta representativa de la dispersión de las razones DAR y IP para la bobina"

En la tabla 3.1 se muestran los valores de la resistencia de aislación obtenidos en el laboratorio de alta tensión del DIE. La tabla siguiente, la número 3.2, muestra los valores de ambos índices obtenidos a partir de los valores de la resistencia de aislación. Además se agrega el estado diagnosticado de la aislación por cada índice y su respectivo número asociado. En esta tabla se puede notar que en la mayoría de las fallas simuladas el diagnóstico del estado de la aislación es el mismo o muy parecido usando el DAR o el IP, sin existir diagnósticos contradictorios o dispares.

En las figuras 3.3 y 3.4 se observa la evolución del IP y del DAR respectivamente, se puede notar que ante un aumento del voltaje aplicado ambos índices tienden a disminuir sus valores, esto debido a que a mayor voltaje se le exige más a la aislación y aumenta la corriente total que pasa a través de la aislación. En las figuras 3.8 se puede observar la relación, con más detalle, que existe entre el valor del DAR y del IP para las distintas fallas y los distintos valores de los voltajes continuos aplicados. Se observa una relación directa, pues ambos índices, a medida que se aumenta el voltaje aplicado y se empeora la falla, disminuyen su valor y el diagnóstico sigue siendo, sino igual, muy similar. La figura 3.9 muestra la curva de tendencia lineal de la relación entre el DAR y el IP.

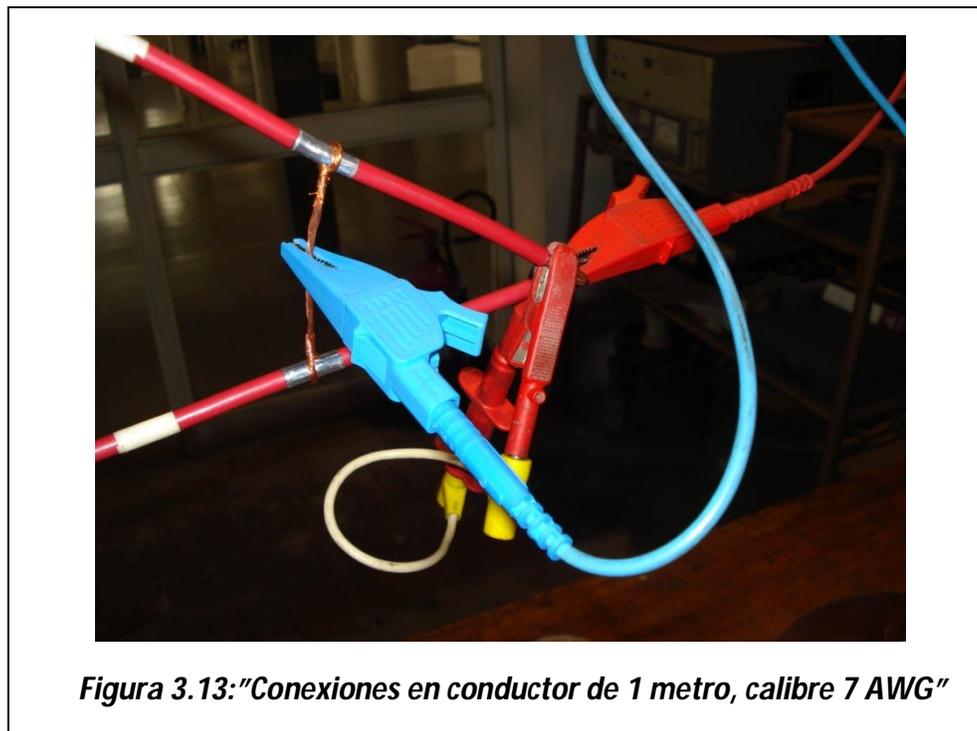
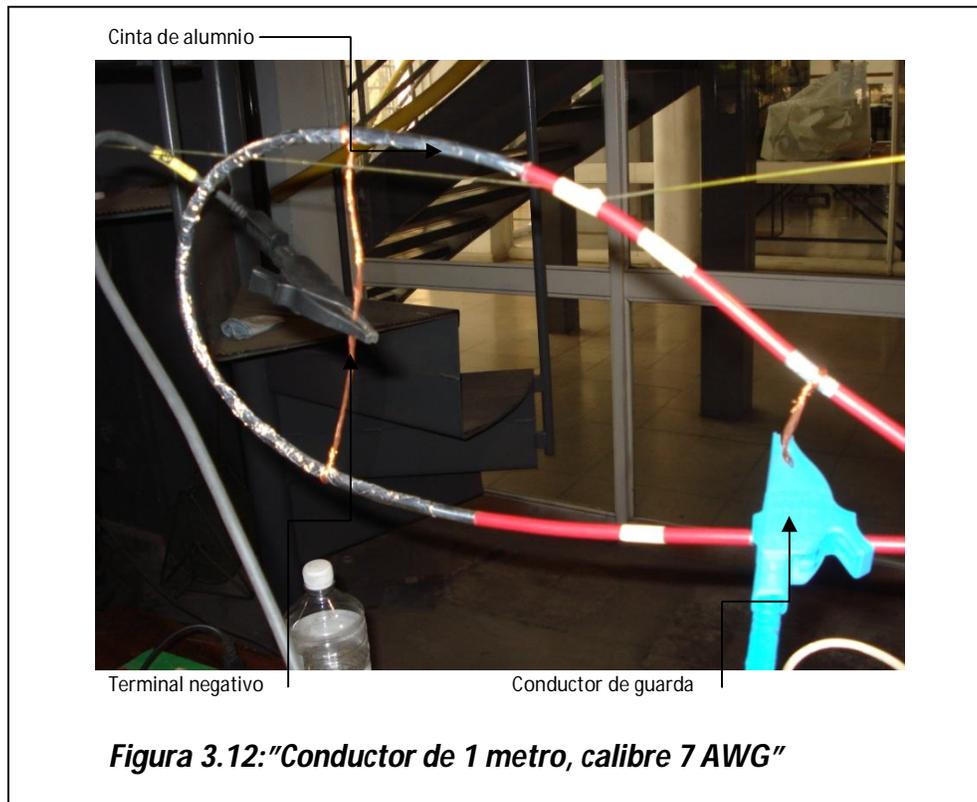
En las figuras 3.5, 3.6 y 3.7 se observa la evolución de la resistencia de aislación en el tiempo para las cuatro distintas fallas y los tres voltajes distintos aplicados. Se nota claramente que a medida que la falla empeora, el valor de la resistencia de aislación disminuye, lo que concuerda perfectamente que el estudio teórico visto en el apartado 2.4.4.

La figura 3.10 corresponde a un gráfico de dispersión entre los valores del DAR y el IP, usando el número asignado para cada estado de diagnóstico (ver tabla 3.2), los puntos negros corresponden al caso en que ambos índices diagnostican el mismo estado de la aislación, y los puntos rojos en los cuales los índices diagnostican estados distintos. La figura 3.11 muestra la curva de tendencia de los datos de la figura anterior, y el error cuadrático calculado cuantifica las discrepancias entre ambos índices en el diagnóstico del estado de la aislación, cuyo valor, para esta experiencia, nos indica que ambos índices diagnostican estados de aislación similares.

3.2.2. Experiencia 2: Medidas de resistencia de aislación en conductor de un metro, calibre 7 AWG, aislación de goma

La segunda experiencia realizada, consistió en medir la resistencia de aislación de un conductor de un metro de largo, calibre 7 AWG y aislación de goma (ver figura 3.12 y 3.13). En esta experiencia se simuló dos fallas, la primera corresponde la mitad de la superficie de la aislación adelgazada, imitando una falla producto de un arrastre del conductor, y la segunda falla corresponde al adelgazamiento completo de la aislación. Además se midió la resistencia de aislación con el conductor bueno (sin adelgazar) para compararla con las dos fallas mencionadas. Cabe destacar que el conductor, al igual que la

bobina se envolvió con cinta de aluminio conductora para así obtener el valor de la resistencia de aislación con el meghómetro.



Los resultados y los gráficos correspondientes para el conductor bueno (sin falla) y las dos fallas simuladas son los siguientes:

Tabla 3.3: Valores de la resistencia de aislación para el conductor de 1 metro, calibre 7 AWG

Cable bueno				
Voltaje	250 V	500 V	1000 V	
R30	357.8	349.8	348.3	GΩ
R1	498	477	462	GΩ
R3,10	956	844	752	GΩ
R10	1678	1508	1412	GΩ
Cable 1/2 falla				
Voltaje	250 V	500 V	1000 V	
R30	287.4	261.5	111.4	GΩ
R1	386	329.5	113.9	GΩ
R3,10	527	407	145.3	GΩ
R10	868.5	658.1	167.4	GΩ
Cable falla completa				
Voltaje	250 V	500 V	1000 V	
R30	6.7	3.69	cc ¹	GΩ
R1	7.5	3.98	cc	GΩ
R3,10	8.1	4.2	cc	GΩ
R10	8.5	4.35	cc	GΩ

Tabla 3.4: Valores y diagnóstico del DAR y el IP para el conductor de 1 metro, calibre 7 AWG

Cable bueno				
Voltaje [V]	DAR	IP	Diagnóstico DAR	Diagnóstico IP
250	1.39	3.37	Regular - 4	Bueno - 5
500	1.36	3.16	Regular - 4	Bueno - 5
1000	1.33	3.06	Regular - 4	Bueno - 5
Cable 1/2 falla				
250	1.34	2.25	Regular - 4	Regular - 4
500	1.26	2	Regular - 4	Regular - 4
1000	1.02	1.47	Pobre - 2	Pobre - 2
Cable falla completa				
250	1.12	1.13	Dudoso - 3	Pobre - 2
500	1.08	1.09	Pobre - 2	Pobre - 2
1000	-	-	Peligroso - 1	Peligroso - 1

¹ Corto Circuito

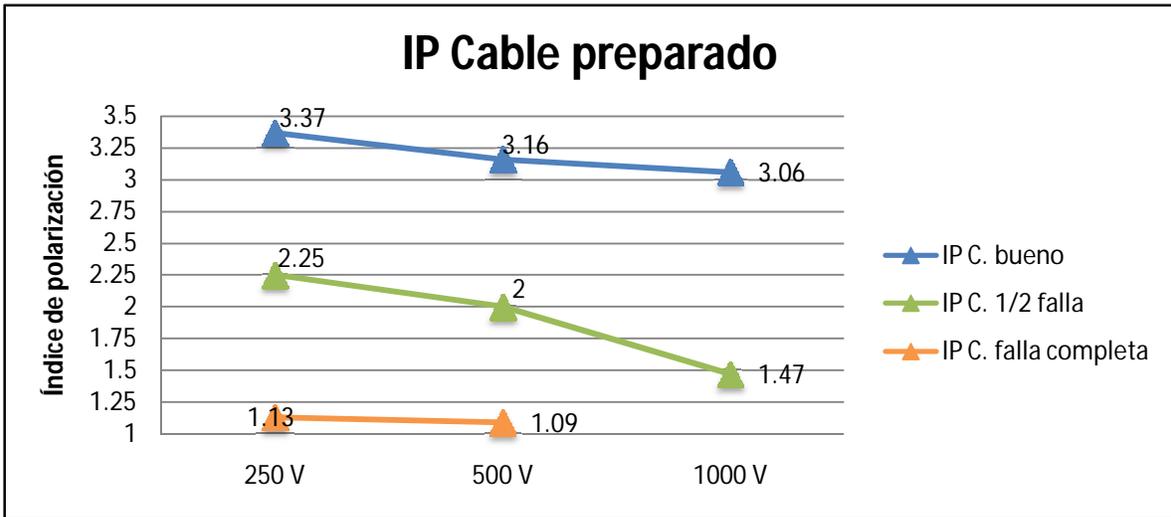


Figura 3.14: "Gráfico del índice de polarización de conductor de 1 metro, calibre 7 AWG"

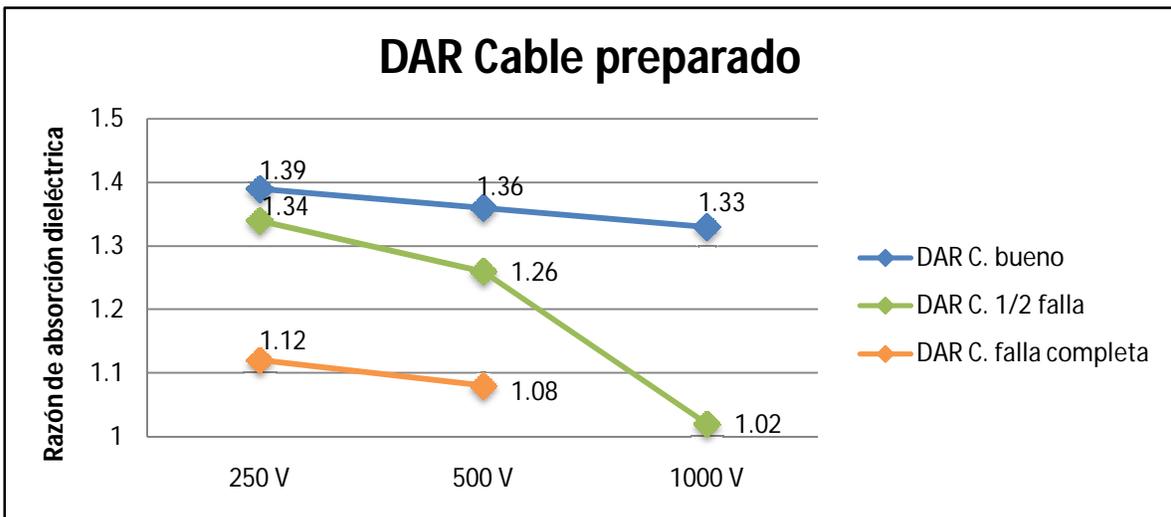


Figura 3.15: "Gráfico de la razón de absorción dieléctrica de conductor de 1 metro, calibre 7 AWG"

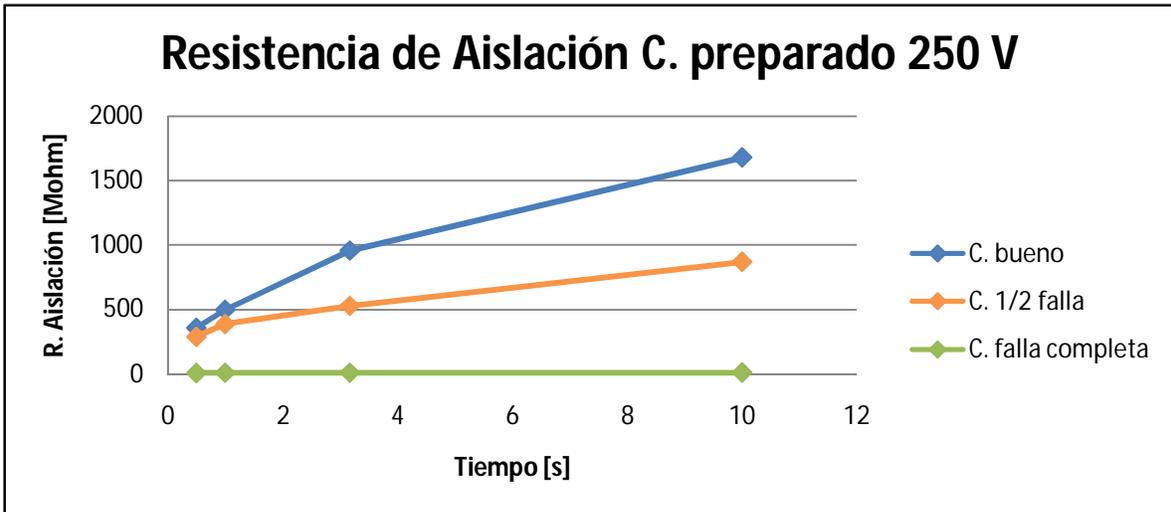


Figura 3.16: "Gráfico de la resistencia de aislación en función del tiempo a 250 V"

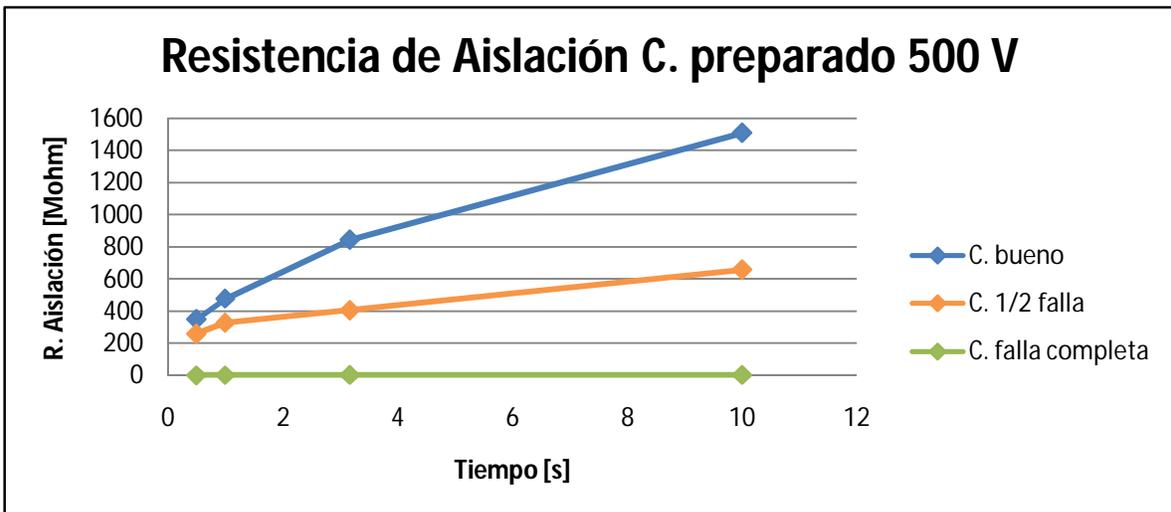


Figura 3.17: "Gráfico de la resistencia de aislación en función del tiempo a 500 V"

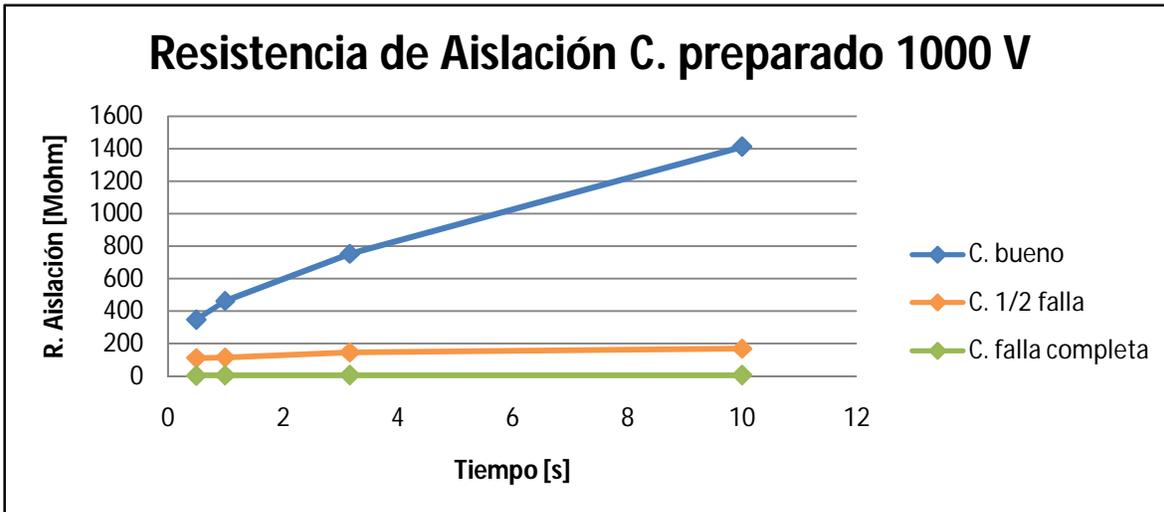


Figura 3.18: "Gráfico de la resistencia de aislación en función del tiempo a 1000 V"

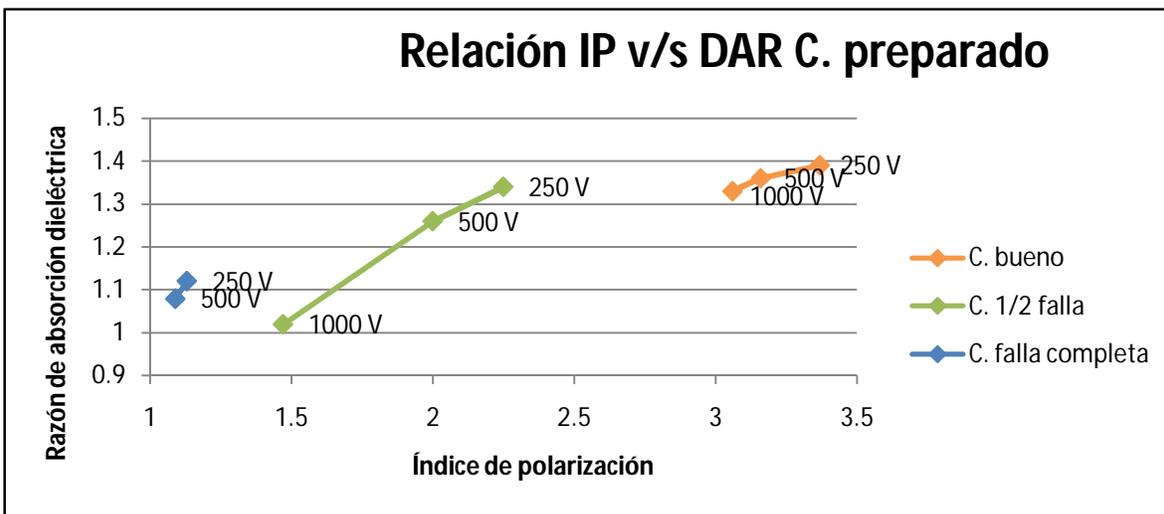


Figura 3.19: "Gráfico de la relación entre el IP y el DAR para el conductor de 1 metro, calibre 7 AWG"

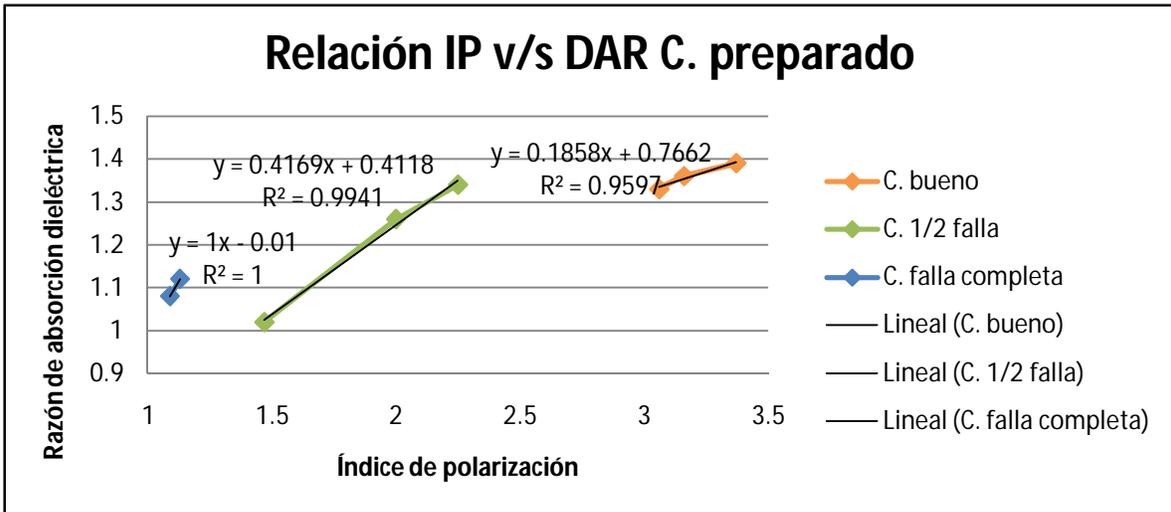


Figura 3.20: " Gráfico de las rectas representativas de la relación entre el IP y el DAR para el conductor de 1 metro, calibre 7 AWG"

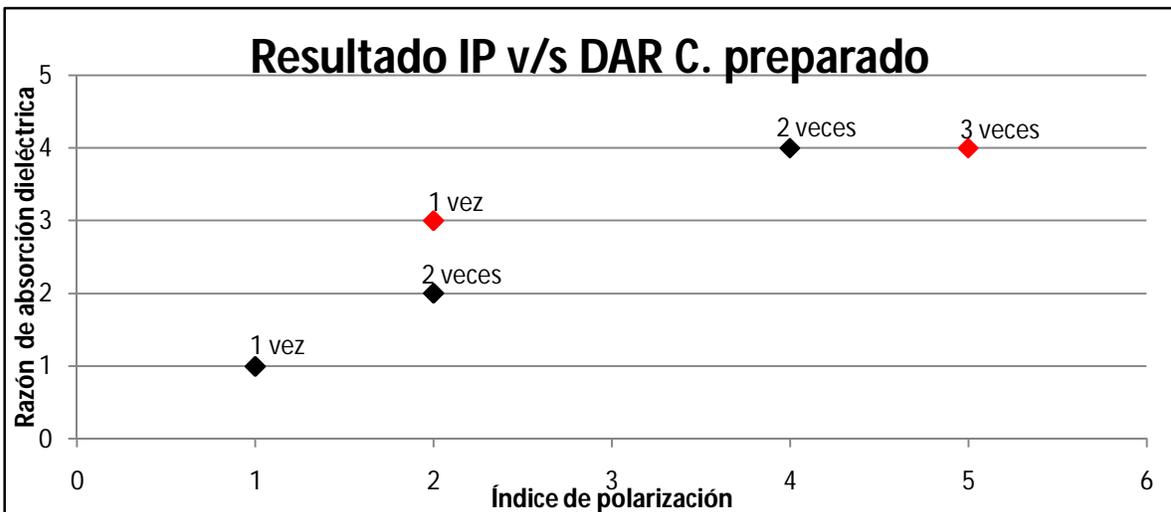


Figura 3.21: " Gráfico de dispersión de las razones DAR y IP para el conductor de 1 metro, calibre 7 AWG"

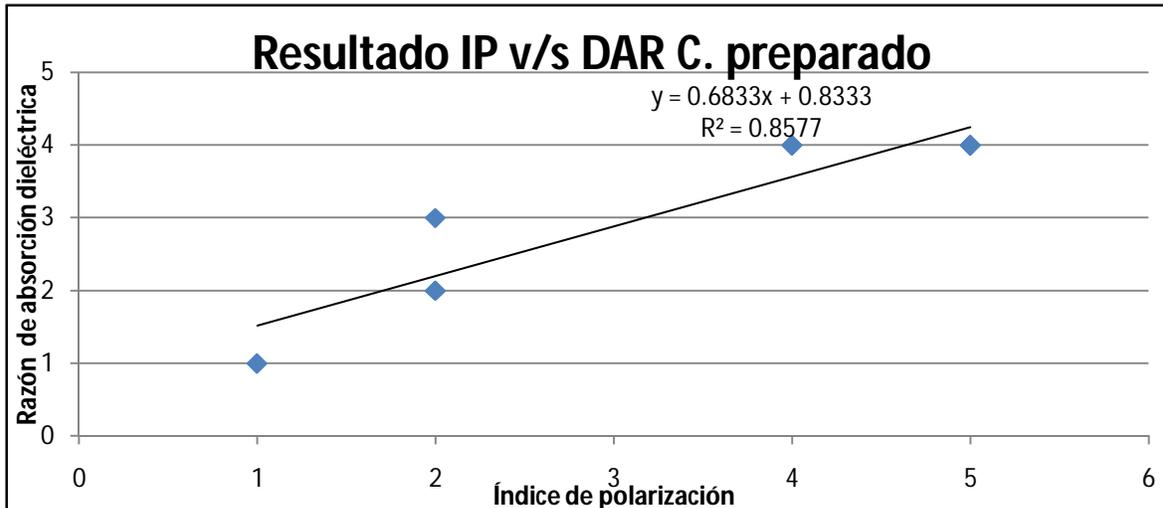


Figura 3.22: " Gráfico de la recta representativa de la dispersión de las razones DAR y IP para el conductor de 1 metro, calibre 7 AWG"

En la tabla 3.3 se muestran los valores de la resistencia de aislación obtenidos en el laboratorio de alta tensión del DIE. La tabla siguiente, la número 3.4, muestra los valores de ambos índices obtenidos a partir de los valores de la resistencia de aislación. Además se agrega el diagnóstico del estado de la aislación y su respectivo número asociado. En esta tabla, al igual que en la primera experiencia, se puede notar que en la mayoría de los casos el diagnóstico del estado de la aislación obtenido a partir del valor del DAR y del IP es el mismo o muy parecido, sin existir diagnósticos contradictorios o dispares, solo diferencias mínimas.

Las conclusiones realizadas en la experiencia anterior se pueden volver a repetir acá, pues en las figuras 3.14 y 3.15 se observa que la evolución del IP y del DAR respectivamente, ante un aumento del voltaje aplicado y al empeorar la falla disminuyen su valor diagnosticando un peor estado de la aislación. Esta relación directa se puede ver con más claridad en las figuras 3.19 y 3.20. La figura 3.20 muestra que existe una relación lineal entre ambos índices.

En las figuras 3.16, 3.17 y 3.18, se observa la evolución del valor de la resistencia de aislación en el tiempo para los distintos estados de la aislación. Se nota claramente que a medida que empeora el estado de la aislación del conductor, el valor de la resistencia de aislación disminuye.

Finalmente la figura 3.21, muestra el gráfico de dispersión de los datos usando el número asignado para cada estado diagnosticado de la aislación, siendo los puntos negros los que indican que ambos índices diagnostican el mismo estado y los rojos en los cuales el

diagnóstico es distinto. La figura 3.22 muestra la recta representativa del gráfico de dispersión, y al igual que en la experiencia anterior el error cuadrático obtenido indica que ambos índices diagnostican una situación igual o muy similar del estado de la aislación.

Es importante destacar que la medida tomada en 1000 V para el conductor con la falla completa se hace un corto circuito, y por lo tanto no se logra obtener un valor. Debido a esto, la aislación inmediatamente se considera en estado peligroso.

3.2.3. Experiencia 3: Medidas de resistencia de aislación en una placa de aislación tipo XLPE

La tercera experiencia realizada se efectuó en el laboratorio de la empresa Nexans S. A. y consistió en medir la resistencia de aislación de una placa de XLPE de 0.7 milímetros de espesor y 8,5 centímetros de diámetro. Ver figura 3.23. Este caso es distinto a los anteriores pues las medidas se tomaron con temperaturas bastante mayores a la del ambiente y además la placa se envejeció térmicamente dos veces en un horno durante 93 horas a 160 °C. En esta experiencia se usó la celda de electrodos y el regulador de temperatura para obtener los valores de resistencia de aislación. El envejecimiento se realizó en el horno marca PS. Ver figuras 3.23 y 3.24.





Como se dijo anteriormente, La primera medida corresponde a la aislación sin envejecimiento térmico, la segunda medida corresponde a la aislación después de estar 93 horas en el horno a 160 °C y la tercera medida corresponde a la aislación después de estar 186 horas en el horno a 160 °C.

Los resultados y los gráficos correspondientes para la placa de aislación tipo XLPE son lo que se muestran a continuación:

Tabla 3.5: Valores de la resistencia de aislación para placa de XLPE

Medida 1					
Meghómetro	BM25	AEMC	BM25	AEMC	
Temperatura	22,5 °C	140 °C	140 °C	120 °C	
Voltaje	1012 V	1012 V	1012 V	1022 V	
R30	F d R ⁽¹⁾	565	575	625	GΩ
R1	F d R	610	605	659	GΩ
R3,10	F d R	623	625	755	GΩ
R10	F d R	698	665	882	GΩ
Medida 2					
Voltaje	1012 V	1010 V	1013 V	1002 V	
R30	F d R ²	78.1	68.9	84.9	GΩ
R1	F d R	82.7	71	87	GΩ
R3,10	F d R	84.2	73	88.1	GΩ
R10	F d R	89.8	74.8	90.5	GΩ
Medida 3					
Voltaje	1012 V	1013 V	1012 V	1002 V	
R30	F d R	35.51	7.15	12.78	GΩ
R1	F d R	30.13	7.13	12.85	GΩ
R3,10	F d R	28.09	7.1	12.89	GΩ
R10	F d R	20.95	7.08	13.01	GΩ

Tabla 3.6: Valores y diagnóstico del DAR y el IP para placa de XLPE

Medida 1						
Voltaje [V]	Temperatura [°C]	Meghómetro	DAR	IP	Diagnóstico DAR	Diagnóstico IP
1012	140	AEMC	1.08	1.14	Pobre - 2	Pobre - 2
1012	140	BM25	1.05	1.1	Pobre - 2	Pobre - 2
1022	120	AEMC	1.05	1.34	Pobre - 2	Pobre - 2
Medida 2						
1010	140	AEMC	1.06	1.09	Pobre - 2	Pobre - 2
1013	140	BM25	1.03	1.05	Pobre - 2	Pobre - 2
1002	120	AEMC	1.02	1.04	Pobre - 2	Pobre - 2
Medida 3						
1013	140	AEMC	0.85	0.7	Peligroso - 1	Peligroso - 1
1012	140	BM25	1	0.99	Pobre - 2	Peligroso - 1
1002	120	AEMC	1.01	1.01	Pobre - 2	Pobre - 2

² Fuera de Rango

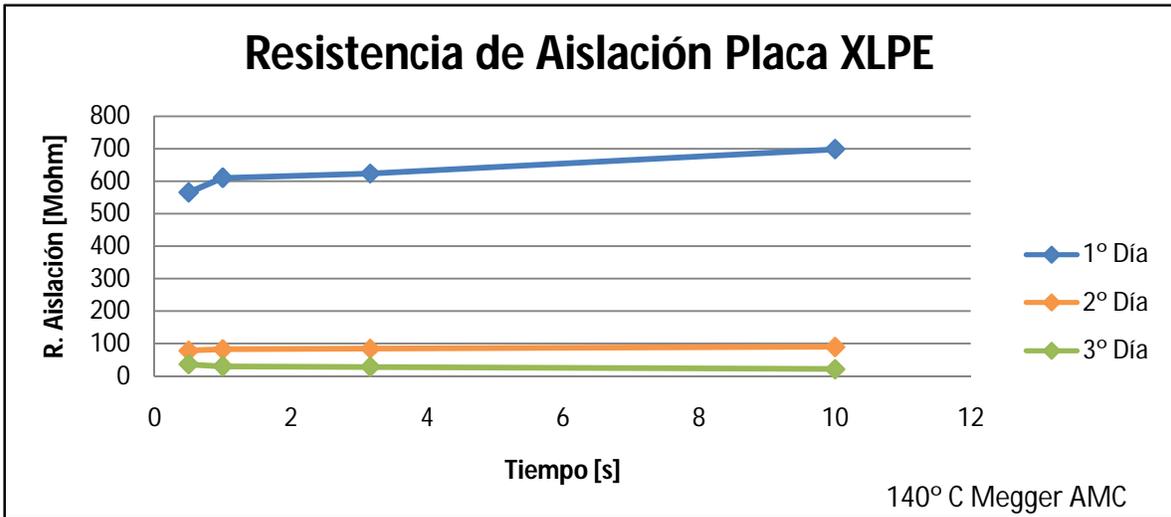


Figura 3.24: "Gráfico de la resistencia de aislación en función del tiempo a 140° C Megger AMC"

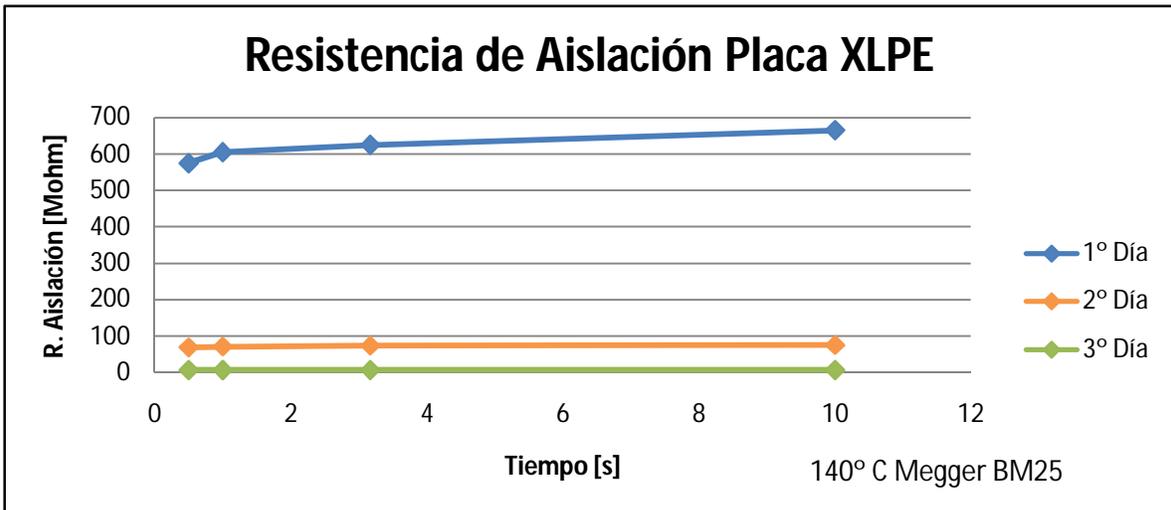


Figura 3.25: "Gráfico de la resistencia de aislación en función del tiempo a 140° C Megger BM25"

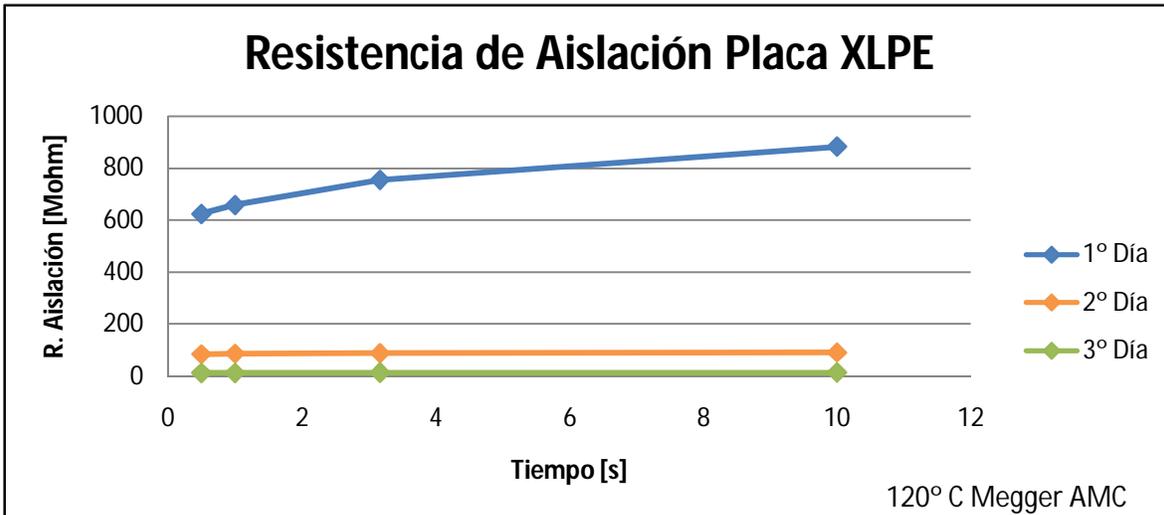


Figura 3.26: "Gráfico de la resistencia de aislación en función del tiempo a 120° C Megger AMC"

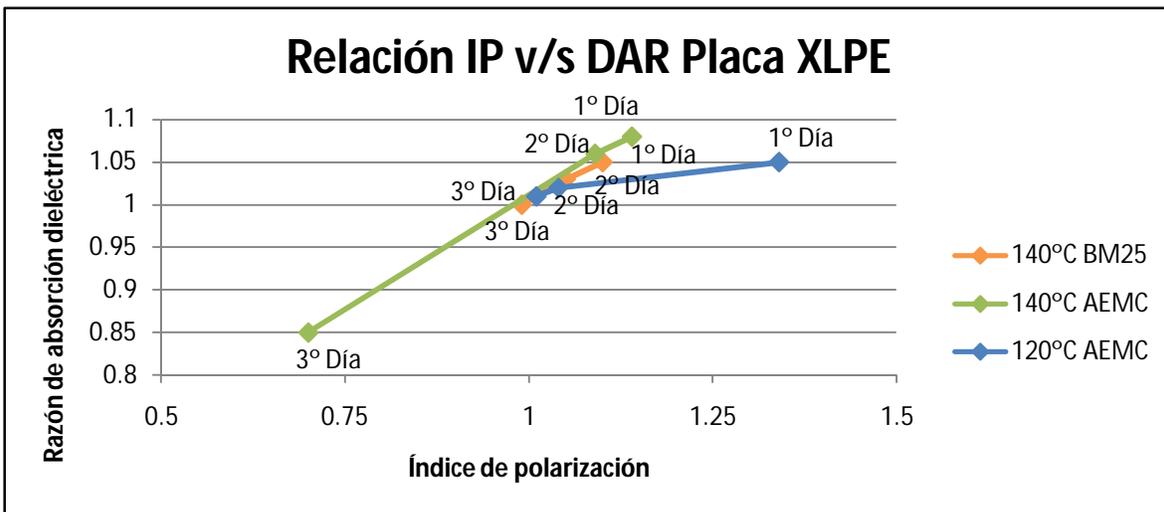


Figura 3.27: "Gráfico de la relación entre el IP y el DAR para la placa de XLPE"

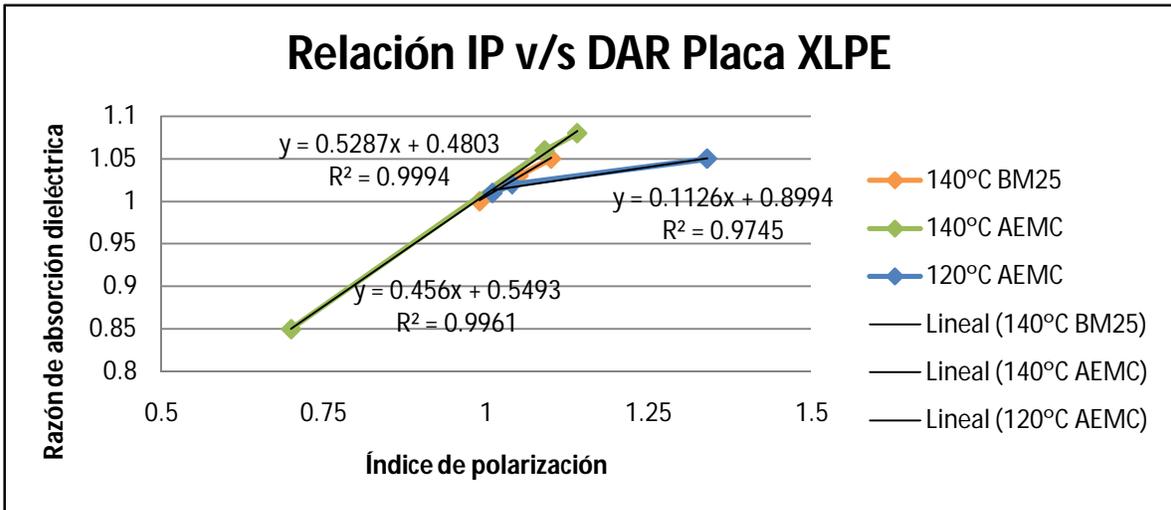


Figura 3.28: " Gráfico de las rectas representativas de la relación entre el IP y el DAR para la placa de XLPE "

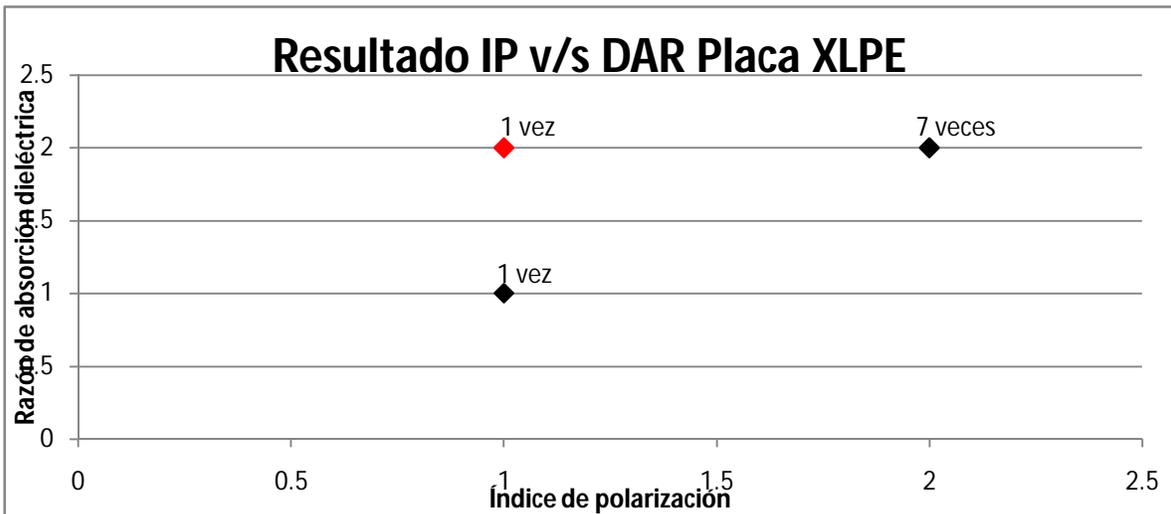


Figura 3.29: " Gráfico de dispersión de las razones DAR y IP para la placa de XLPE "

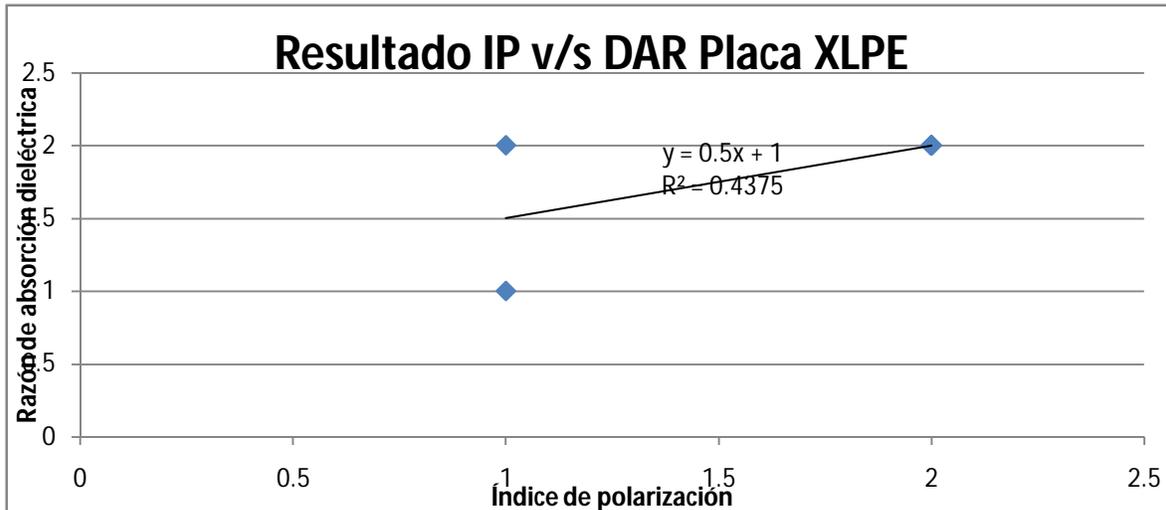


Figura 3.30: " Gráfico de la recta representativa de la dispersión de las razones DAR y IP para la placa de XLPE"

La tabla 3.5 muestra los valores de la resistencia de aislación obtenidos en el laboratorio de Nexans S. A. La tabla siguiente, la número 3.6, muestra los valores del DAR y del IP obtenidos a partir de los valores de la resistencia de aislación. Además se agrega el diagnóstico de la aislación y su respectivo número asociado. En esta tabla, al igual que en la primera y segunda experiencia, se puede notar que en la mayoría de los casos el diagnóstico del estado de la aislación dado por cada uno de los dos índices es el mismo o muy parecido, sin existir diagnósticos contradictorios o dispares.

Las tablas 3.5 y 3.6 también muestran que para la temperatura ambiente, la placa de XLPE sigue siendo un muy buen aislante y que, a pesar de estar envejecida térmicamente el valor de la resistencia de aislación es tan alto que el megohmetro no es capaz de cuantificarlo (el valor de la resistencia de aislación es mayor al valor superior que mide el megohmetro usado, que en este caso es cuatro tera-ohms).

Como en los casos anteriores, si no se consideran las medidas tomadas a temperatura ambiente, se puede observar en las figuras 3.24, 3.25 y 3.26 que la resistencia de aislación disminuye su valor después de cada envejecimiento térmico. Esto concuerda con la teoría pues con cada envejecimiento la aislación se daña, perdiendo propiedades dieléctricas.

La figura 3.29 corresponde al gráfico de dispersión de los datos, el color de los puntos representa lo mismo que en las experiencias anteriores. En el caso en que ambos índices diagnostican el mismo estado de la aislación se marca con un punto negro y los

puntos rojos cuando no. En esta experiencia se puede apreciar con mayor claridad la relación directa que existe entre el DAR y el IP (ver figura 3.27 y 3.28), puesto que en un solo caso el diagnóstico fue distinto, sin embargo la diferencia del estado diagnosticado es mínima (el IP indica un estado peligroso y el DAR un estado pobre de la aislación en ese caso particular).

La figura 3.30 muestra la recta característica de los datos de dispersión de la experiencia 3, y corrobora lo anteriormente dicho, pues el error cuadrático es muy cercano a uno. Esto se interpreta como que ambos índices están indicando un muy parecido estado de la aislación.

3.2.4. Experiencia 4: Medidas de resistencia de aislación en un conductor de 15 metros de largo, aislación tipo XLPE y calibre 16 AWG

La cuarta experiencia realizada, consistió en medir la resistencia de aislación de un conductor de 15 metros de largo, aislación tipo XLPE y calibre 16 AWG. Esta experiencia, al igual que la anterior se realizó en el laboratorio de la empresa Nexans S. A. A diferencia de las experiencias anteriores, las medidas se tomaron con el conductor sumergido en agua a 90 °C, como lo muestra la figura 3.31. Se eligió esta temperatura para simular la que tiene el conductor en funcionamiento y analizar el efecto de la humedad sobre la aislación.



Al igual que en el caso anterior, el conductor se envejeció térmicamente en el horno dos veces durante 93 horas cada uno a 160 °C. La primera medida corresponde al conductor recién salido de fábrica, La segunda medida corresponde al conductor después de un envejecimiento de 93 horas y la tercera medida al conductor después de 186 horas de envejecimiento térmico. Ver figura 3.32.



Figura 3.32: "Conductor dentro del horno y conexiones para medir el valor de la resistencia de aislación"

Los resultados y los gráficos correspondientes para el conductor de aislación tipo XLPE son lo que se muestran a continuación:

Tabla 3.7: Valores de la resistencia de aislación para conductor de 15 metros

Medida 1		
Meghómetro	BM25	
Temperatura	90 °C	
Voltaje	500 V	
R30	9.64	GΩ
R1	12.66	GΩ
R3,10	16.54	GΩ
R10	27.8	GΩ
Medida 2		
Voltaje	500 V	
R30	28.5	GΩ
R1	42.7	GΩ
R3,10	58.3	GΩ
R10	95.2	GΩ
Medida 3		
Voltaje	500 V	
R30	10.8	GΩ
R1	7.66	GΩ
R3,10	1.3	GΩ
R10	0	GΩ

Tabla 3.8: Valores y diagnóstico del DAR y el IP para conductor de 15 metros

Medida 1				
Voltaje [V]	DAR	IP	Diagnóstico DAR	Diagnóstico IP
500	1.31	2.2	Regular – 4	Regular – 4
Medida 2				
500	1.5	2.23	Bueno – 5	Regular – 4
Medida 3				
500	0.71	0	Peligroso – 1	Peligroso – 1

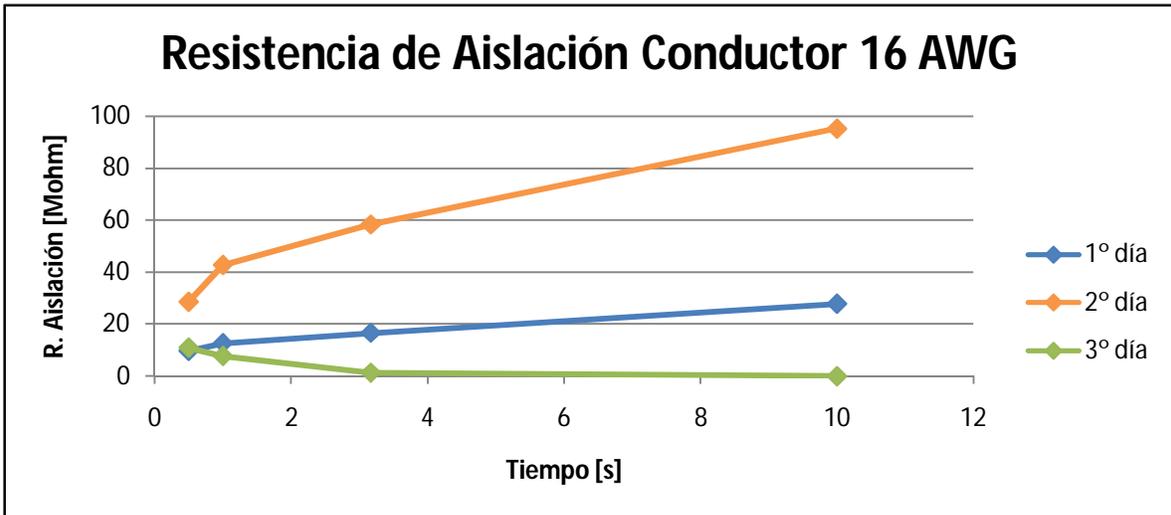


Figura 3.33: "Gráfico de la resistencia de aislación en función del tiempo para conductor de 15 metros"

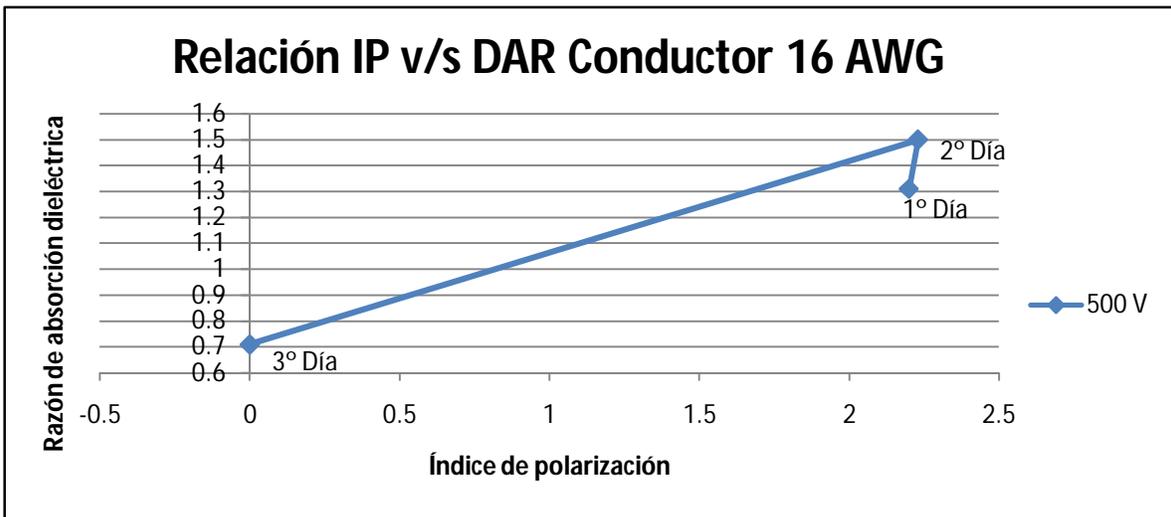


Figura 3.34: "Gráfico de la relación entre el IP y el DAR para conductor de 15 metros"

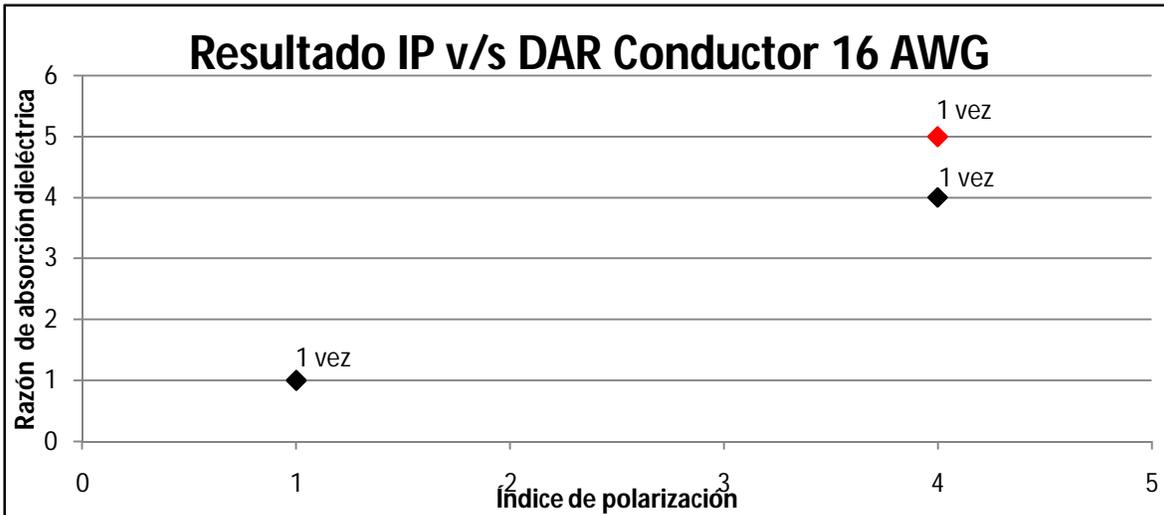


Figura 3.35: "Gráfico de dispersión de las razones DAR y IP para conductor de 15 metros"

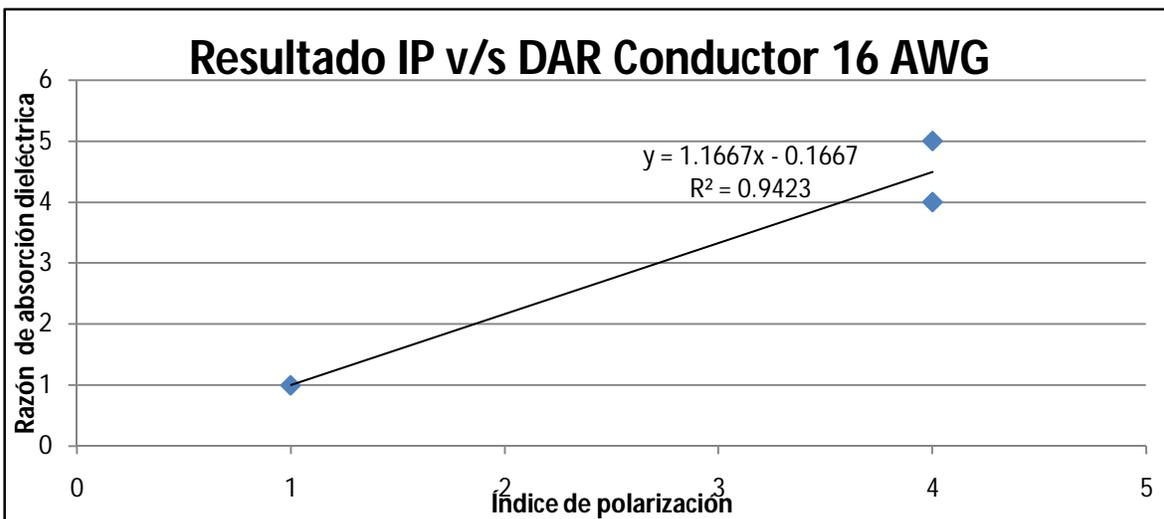


Figura 3.36: "Gráfico de la recta representativa de la dispersión de las razones DAR y IP para conductor de 15 metros"

La tabla número 3.7 muestra a los valores obtenidos en el laboratorio de la resistencia de aislación del conductor sumergido en agua. La tabla siguiente muestra los valores del DAR y el IP calculados para las tres estados distintos del conductor. En esta experiencia ocurre algo muy particular e imprevisible, porque después de estar el conductor por primera vez 93 horas dentro del horno a 160 °C aumenta sus valores de resistencia de aislación. La explicación más lógica que se le pudo dar a este efecto fue entregada por personal de Nexans, y es que la aislación tipo XLPE de este conductor posee ciertos elementos que al efectuarles el envejecimiento térmico aumentan su capacidad de aislación, pero a cambio pierden propiedades mecánicas. Esto se comprobó pues el conductor ya no se encontraba tan flexible como en un inicio.

Luego del segundo envejecimiento térmico, la aislación del conductor disminuyó considerablemente su valor de resistencia de aislación, llegando a los 10 minutos de aplicado el voltaje a un valor cercano a 0.

La tabla número 3.8 muestra los valores del DAR y del IP, se observa que en el día dos, ambos índices diagnostican un mejor estado de la aislación, concordante con el aumento del valor de la resistencia de aislación. De todas maneras, a pesar del efecto anteriormente mencionado, el DAR y el IP continúan diagnosticando estados similares, sin existir en ninguno de los tres casos diagnósticos dispares. Esto se ratifica en la figura 3.36 que muestra la recta representativa de la dispersión de los valores del DAR y el IP.

En la figura 3.34 se puede observar el comportamiento anómalo de la aislación debido al envejecimiento térmico.

4. CONCLUSIONES

4.1. Conclusiones del marco teórico

Los materiales dieléctricos se caracterizan porque poseen muy pocas cargas eléctricas libres, siendo la mayoría de ellas del tipo ligadas. Los fenómenos de polarización del medio producto de estas cargas ligadas se pueden clasificar en cuatro tipos: polarización electrónica, polarización iónica o atómica, polarización de orientación dipolar y polarización interfacial, siendo esta última la más importante para describir el fenómeno de absorción dieléctrica, debido a que esta polarización es mucho más lenta que las otras.

Cuando a una aislación se le aplica un voltaje continuo la corriente total que circula se puede dividir en tres componentes:

- a) corriente capacitiva geométrica
- b) corriente de absorción
- c) corriente de conducción.

Siendo las magnitudes relativas de las corrientes de absorción y conducción las que se usan determinar el estado de una aislación, como por ejemplo los métodos del índice de polarización (IP) y razón de absorción dieléctrica (DAR), definidos como:

$$IP = \text{Índice de polarización} = \frac{(i_a+i_c)_{1 \text{ minuto}}}{(i_a+i_c)_{10 \text{ minutos}}} = \frac{RA_{10m}}{RA_{1m}} \quad (4.1)$$

$$DAR = \text{Razón de Absorción Dieléctrica} = \frac{(i_a+i_c)_{30 \text{ segundos}}}{(i_a+i_c)_{1 \text{ minuto}}} = \frac{RA_{1m}}{RA_{30s}} \quad (4.2)$$

La medida de resistencia de aislación es uno de los test más usuales para diagnosticar el estado de una aislación, determinada luego de aplicar una tensión continua constante durante un tiempo. Normalmente se mide al minuto de haberse aplicado la tensión. Este mismo test es que se usa para obtener los valores del DAR y el IP

midiendo la resistencia de aislación a los 30 segundos y al minuto para el DAR y al minuto y a los 10 minutos para el IP.

Es importante hacer un seguimiento histórico de los datos obtenidos en el test de resistencia de aislación, pues la variación del DAR y del IP en el tiempo refleja mejor la condición en que se encuentra una aislación, que puede deteriorarse producto de desgastes, sobretensiones, roturas, humedad, descomposiciones, etc.

El valor de la resistencia de aislación disminuye a medida que empeora el estado de una aislación esto principalmente debido a que la corriente de conducción aumenta y pasa a ser más considerable que la corriente de absorción.

4.2. Conclusiones del trabajo experimental

Lo principal del trabajo experimental fue que se pudo comprobar la eficiencia y veracidad de la razón de absorción dieléctrica (DAR) para medir el estado de una aislación.

Esto se logró mediante la comparación empírica con el índice de polarización, ya que éste se consideró como un método más conocido para diagnosticar el estado de una aislación. En los cuatro casos estudiados en los diferentes laboratorios los datos arrojaron que entre el DAR y el IP existe una alta correlación, y que cuando el diagnóstico entregado por las razones es distinto, la diferencia es mínima. Por ejemplo en el caso de la bobina, para la primera falla a un voltaje constante de 1000 V, el DAR diagnostica un estado excelente, el IP diagnostica un estado de la aislación bueno.

No existen diagnósticos contradictorios, como por ejemplo que por un lado el DAR indica que la aislación se encuentra en buen estado y el IP indica lo contrario, es decir que se encuentra en mal estado.

Otro resultado interesante es que la aislación de XLPE, a pesar de los envejecimientos térmicos realizados en el horno, sigue manteniendo muy buenas propiedades aisladoras a temperatura ambiente, y que a temperaturas sobre los 100 °C dejaba de ser buen aislador.

Se comprobó además que el valor de la resistencia de aislación disminuye a medida que se deteriora la aislación, obteniéndose las curvas de la evolución de la aislación para las cuatro experiencias. Hay que considerar, sin embargo, que se encontró un caso anómalo, en el cual después de envejecer la aislación tipo XLPE de un conductor

de 15 metros de largo (Experiencia 4), el valor de la resistencia de aislación aumento, al igual que el valor del DAR y del IP. Este efecto sorprendió incluso a los empleados de Nexans S. A. y la única explicación lógica fue que dentro de los componentes que forman la aislación existen algunos que empeoran el valor de la resistencia de aislación, pero luego del envejecimiento térmico de 93 horas a 160 °C estos se evaporan, aumentando el valor de la resistencia de aislación. Después del segundo envejecimiento, la aislación se deterioró considerablemente, llegando a generar corto circuito antes de los 10 minutos de prueba.

El DAR debido a que necesita menos tiempo que el IP para ser calculado puede servir de gran ayuda para diagnosticar el estado de una aislación cuando el tiempo que se tiene sea escaso, y como se investigó, los resultados son muy similares al del IP.

Finalmente, podría ser de gran ayuda que estos mismos índices se estudien ahora en equipos en funcionamiento y con fallas reales, no con fallas simuladas y en laboratorio donde las cosas tienden a ser más idealizadas y no representan necesariamente la realidad.

5. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Valdenegro, Ariel. "Apuntes de EM720: Aislación de equipos de alta tensión", Depto. Ingeniería Eléctrica, Universidad de Chile. 1997
- [2] Palacios, Jorge. "Pruebas dieléctricas para determinar el estado de las aislaciones en equipos de alta tensión", Depto. Ingeniería Eléctrica, Universidad de Chile. 1987
- [3] IEEE. Std N° 43 "Recommended Practice for Testing Insulation Resistance of Rotating Machinery". 2000
- [4] Pérez, Pedro Avelino. "Transformadores de distribución: Teoría, cálculo, construcción y pruebas". Editorial Reverte. 2001
- [5] Tapia Arriagada, Ricardo Eugenio. "Medición de descargas parciales en máquinas rotatorias". Memoria de Ingeniero Civil Electricista. Universidad de Chile. 2005