

1-1-1996

Control de secamiento para transformadores de potencia 5 MVA en adelante y tensiones de la serie 34.5 KV en adelante mediante la medición del factor de potencia de los aislamientos (ensayos eléctricos a transformadores de potencia)

Alvaro Alonso Martínez Hernández
Universidad de La Salle, Bogotá

Follow this and additional works at: https://ciencia.lasalle.edu.co/ing_electrica

Citación recomendada

Martínez Hernández, A. A. (1996). Control de secamiento para transformadores de potencia 5 MVA en adelante y tensiones de la serie 34.5 KV en adelante mediante la medición del factor de potencia de los aislamientos (ensayos eléctricos a transformadores de potencia). Retrieved from https://ciencia.lasalle.edu.co/ing_electrica/338

This Trabajo de grado - Pregrado is brought to you for free and open access by the Facultad de Ingeniería at Ciencia Unisalle. It has been accepted for inclusion in Ingeniería Eléctrica by an authorized administrator of Ciencia Unisalle. For more information, please contact ciencia@lasalle.edu.co.

T
4296
M338C
92

**CONTROL DE SECAMIENTO PARA TRANSFORMADORES DE
POTENCIA 5 MVA EN ADELANTE Y TENSIONES DE LA SERIE 34.5 KV
EN ADELANTE MEDIANTE LA MEDICION DEL FACTOR DE POTENCIA
DE LOS AISLAMIENTOS
(ENSAYOS ELECTRICOS A TRANSFORMADORES DE POTENCIA)**

ALVARO ALONSO MARTINEZ HERNANDEZ 42902056

**SANTAFE DE BOGOTA
UNIVERSIDAD DE LA SALLE
FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRICA
JUNIO DE 1996**



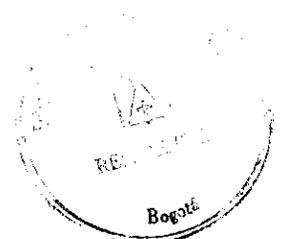
**CONTROL DE SECAMIENTO PARA TRANSFORMADORES DE
POTENCIA 5 MVA EN ADELANTE Y TENSIONES DE LA SERIE 34.5 KV
EN ADELANTE MEDIANTE LA MEDICION DEL FACTOR DE POTENCIA
DE LOS AISLAMIENTOS
(ENSAYOS ELECTRICOS A TRANSFORMADORES DE POTENCIA)**

ALVARO ALONSO MARTINEZ HERNANDEZ COD.42902056

***Tesis de Grado Presentada como
requisito para optar el titulo de
Ingeniero Electricista.***

**Director: ORLANDO GIRALDO
Ing. Electricista
UTP**

**SANTAFE DE BOGOTA
UNIVERSIDAD DE LA SALLE
FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRICA
JUNIO DE 1996**



AGRADECIMIENTOS

El autor expresa su agradecimiento a:

- A **SIEMENS DE COLOMBIA**, especialmente al Ingeniero **ORLANDO GIRALDO** director del presente trabajo, por la oportunidad que me brindo al realizar mi practica profesional en esta firma y así mismo por toda la colaboración que me presto durante todo el transcurso de tiempo que implico realizar este trabajo.
- A El señor **IVAN DRADA** supervisor de bobinas de potencia de **SIEMENS** por su apoyo y colaboración
- A El ingeniero **GUILLERMO ZULUAGA** supervisor de montaje y premontaje de transformadores de potencia de **SIEMENS** por toda su colaboración y apoyo.
- A Departamento de Control de Calidad de transformadores de **SIEMENS**, muy especialmente a los ingenieros **NELSON LOZANO** y **GLORIA GARZON**, al señor **EFRAIN GUEVARA** por su valiosa asesoría y colaboración para la realización del presente documento.
- A Al personal de montaje y premontaje de la misma firma por su colaboración.
- A la **UNIVERSIDAD DE LA SALLE**
- A Todas aquellas personas que de una u otra forma colaboraron para la realización del presente trabajo.

NOTA DE ACEPTACION



Ing. ORLANDO GIRALDO
Director del Proyecto

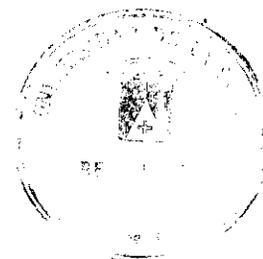


Ing. Ernesto Gallo Martínez
Jurado



Ing. Filiberto Bojacá
Jurado

SANTAFE DE BOGOTA. D.C



DEDICATORIA

A mis padres y hermanos por su apoyo, igualmente a todas aquellas personas que colaboraron para la realización de este trabajo.

TABLA DE CONTENIDO

	Pag.
0. INTRODUCCION	
1. ENSAYOS ELECTRICOS REALIZADOS EN FABRICA A LOS AISLAMIENTOS EN TRANSFORMADORES DE POTENCIA.	1
1.1.1 Realización del ensayo de tensión aplicada	2
1.1.2 Equipos utilizados en la prueba	3
1.1.3 Recomendaciones del ensayo	4
1.1.4 Normas que cobijan el ensayo	4
1.2 ENSAYO DE TENSION INDUCIDA	4
1.2.1 Realización del ensayo de tensión inducida	5
1.2.2 Consideración sobre la prueba	7
1.2.3 Recomendaciones para realizar el ensayo	7
1.2.4 Normas que cobijan el ensayo	7
1.3 ENSAYO DE TENSION DE IMPULSO A TRANSFORMADORES POTENCIA	8
1.3.1 Conceptos generales de la prueba de impulso	8
1.3.1.1 Coordinación de aislamientos	8
1.3.1.2 Tensión no disruptiva	8
1.3.1.3 Nivel de aislamiento	8

	Pag.
1.3.1.4 Nivel de aislamiento transitorio	9
1.3.1.5 Nivel de aislamiento al impulso tipo descarga atmosférica	9
1.3.1.6 Nivel de aislamiento al impulso tipo maniobra	9
1.3.1.7 Nivel básico de aislamiento	9
1.3.2 Formas de onda de impulso	9
1.3.2.1 La onda plena	9
1.3.2.2 La onda recortada	10
1.3.2.3 Frente de onda	11
1.3.3 Circuito de prueba de impulso	12
1.3.4 Mediciones de las tensiones de impulso	12
1.3.5 Realización del ensayo de tensión de impulso	14
1.3.6 Normas que cobijan el ensayo	16
2. ENSAYOS ELECTRICOS EFECTUADOS A LOS AISLAMIENTOS DE LOS TRANSFORMADORES EN CAMPO	17
2.1 MEDIDA DE LA RESISTENCIA DE AISLAMIENTO	17
2.1.1 Megger	21
2.1.2 Pruebas de aislamiento a transformadores	21
2.1.2.1 Verificar el estado del Megger	21
2.1.2.2 Nivelar el instrumento	21
2.1.2.3 Pruebas con Megger	21
2.2 FACTOR DE POTENCIA DE LOS AISLAMIENTOS	22
2.3 NORMAS QUE RIGEN LOS ENSAYOS DE CAMPO	24
3. METODOS DE SECADO DE LA PARTE ACTIVA UTILIZADOS EN FABRICA PARA TRANSFORMADORES DE POTENCIA	25
3.1 EFECTOS DEL AGUA SOBRE EL SISTEMA AISLANTE DEL TRANSFORMADOR	26

	Pag.
3.2 UBICACION DEL AGUA CONTENIDA EN EL TRANSFROMADOR	27
3.2.1 Agua disuelta en el seno del aceite del transformador	27
3.2.2 Agua suspendida en el aceite del transformador	28
3.2.3 Agua depositada en el fondo del transformador	28
3.2.4 Agua asociada a los ácidos orgánicos derivados de la descomposición del aceite	29
3.2.5 Agua absorbida en la celulosa del papel y la madera	29
3.3 MATERIALES ASOCIADOS AL PROCESO DE SECADO DE LA PARTE ACTIVA	29
3.3.1 Papel PRESSPAN	30
3.3.2 Papel KRAFT	31
3.3.3 Madera KP	31
3.4 METODOS DE FABRICA PARA EL SECADO DE LA PARTE ACTIVA	31
3.4.1 Método de secado por calentamiento	31
3.4.2 Secado por calentamiento y aplicación de vacío	34
3.4.3 Método de Fase de Vapor (Vaportherm)	37
4. METODOS DE SECADO UTILIZADOS EN CAMPO Y CONTROLES DE SECAMIENTO	40
4.1 METODO CONVENCIONAL DE SECADO EN CAMPO	40
4.1.1 Bombas de recirculación	41
4.1.2 Calentadores	41
4.1.3 Equipo de secado	41
4.1.4 Filtros de arcilla	41
4.1.5 Dosificador de Inhibidor	43
4.1.6 Filtros micrométricos	43
4.1.7 Tanques auxiliares	43

	Pag.
4.1.8 Mangueras	43
4.1.9 Instrumentación	44
4.2 CALENTAMIENTO POR CORTOCIRCUITO, RECIRCULACION DE ACEITE Y APLICACION DE VACIO	44
4.3 METODO DE ASPERSION DE ACEITE CALIENTE (HOT SPRAY)	45
4.4 METODO CRIOGENICO	48
4.5 DETERMINACION DEL PUNTO FINAL DE SECADO	50
4.5.1 Medida del punto de Rocío	50
4.5.2 Medida del agua extraída por condensación	51
4.5.3 Indice de polarización	54
4.5.4 Medida de la variación de la resistencia de los aislamientos	54
4.5.5 Medición del factor de potencia de los aislamientos	54
4.5.5 Medición del voltaje de paso	54
4.5.6 Medición del contenido de humedad mediante los multiplicadores de Myers	55
4.6 VIDA UTIL DEL TRANSFORMADOR ASOCIADA CON LA TEMPERATURA DE LOS DEVANADOS	56
4.7 BENEFICIOS DEL SECADO	63
5.1 CONTROL DE SECAMIENTO MEDIANTE LA MEDICION DEL FACTOR DE PERDIDAS DE LOS AISLAMIENTOS	64
5.1 GENERALIDADES	64
5.1.1 Capacitancia	64
5.1.2 Factor de Disipación	65
5.1.3 Angulo de pérdidas	65
5.1.4 K''	66
5.1.5 Angulo de fase	66
5.1.6 Factor de potencia	66

	Pag
5.1.7 Permitividad relativa	66
5.2 MEDICION DE CAPACITANCIAS Y $\tan\delta$	67
5.2.1 El circuito UST	68
5.2.2 El circuito GST	69
5.2.3 El circuito GSTg	70
5.3 CONTROL DE SECAMIENTO MEDIANTE LA MEDIDA DE LA $\tan\delta$	70
5.3.1 Aspectos a tener en cuenta	71
5.3.1.1 Métodos de secado con solo calentamiento	71
5.3.1.2 Métodos con aplicación de vacío	71
5.3.2 Instalación adecuada para la medida de la $\tan\delta$ en el proceso de secado	71
5.3.3 Resultados esperados	72
6. ENSAYOS Y CONCLUSIONES	76
6.1 ENSAYO DE SECADO AL PRESSPAN DE 2 mm (T 100 °C)	76
6.1.1 Objetivo del ensayo	76
6.1.2 Condiciones del ensayo	76
6.1.3 Uso del presspan	76
6.1.4 Norma seguida	77
6.1.5 Equipos y materiales utilizados	77
6.1.6 Procedimiento de ensayo	78
6.1.7 Valores Obtenidos	78
6.1.8 Conclusiones	79
6.2 ENSAYO DE SECADO AL PRESSPAN DE 2 mm (T 120 °C)	81
6.2.1 Objetivo del ensayo	81
6.2.2 Condiciones del ensayo	81
6.2.3 Uso del presspan	81

	Pag
6.2.4 Norma seguida	81
6.2.5 Equipos y materiales utilizados	82
6.2.6 Procedimiento del ensayo	82
6.2.7 Valores Obtenidos	82
6.2.8 Conclusiones	83
6.3 ENSAYO DE SECADO AL PRESSPAN DE 2 mm (T = 145 °C)	84
6.3.1 Objetivo del ensayo	84
6.3.2 Condiciones del ensayo	84
6.3.3 Uso del presspan	84
6.3.4 Norma seguida	84
6.3.5 Equipos y materiales utilizados	85
6.3.6 Procedimiento del ensayo	85
6.3.7 Valores obtenidos	85
6.3.8 Conclusiones	86
6.4 ENSAYO A LA MADERA K.P	87
6.4.1 Objetivo del ensayo	87
6.4.2 Condiciones del ensayo	87
6.4.3 Uso de la madera K.P	87
6.4.4 Procedimiento del ensayo	87
6.4.5 Valores obtenidos	88
6.4.6 Conclusiones	88
6.5 ENSAYO DE $\tan\delta$ PARA TRANSFORMADORES TERMINADOS	89
6.5.1 Objetivo del ensayo	89
6.5.2 Norma seguida	89
6.5.3 Equipos y materiales utilizados	89

	Pag
6.5.4 Procedimiento de trabajo	89
6.5.5 Conclusiones	89
6.6 ENSAYO DE $\tan\delta$ AL PAPEL	97
6.6.1 Norma seguida	97
6.6.2 Conclusiones	99
7. CONCLUSIONES GENERALES	94
BIBLIOGRAFIA	
ANEXOS	

TABLA DE FIGURAS

	Pag.
FIGURA 1. Circuito para ensayo de tensión aplicada	2
FIGURA 2. Tensión de impulso de onda completa 1.2-50 μ s	10
FIGURA 3. Tensión de impulso de onda recortada	11
FIGURA 4. Generador de Marx modificado	13
FIGURA 5. Ensayos con el Megger	
a. Devanado de alta tensión contra baja tensión	
b. Devanado de alta tensión contra devanado de baja tensión más tierra.	
c. Devanado de baja tensión contra devanado de alta tensión más tierra.	22
FIGURA 6. Secado por calentamiento.	32
FIGURA 7. Instrumentación básica para un proceso de secado por calentamiento	33
FIGURA 8. Perfil de temperatura para un proceso de secado con calentamiento y aplicación de vacío.	35
FIGURA 9. Tendencia de humedad extraída en un transformador de potencia	36
FIGURA 10. Equipos utilizados en el mantenimiento de transformadores en campo.	42
FIGURA 11. Instrumentación para un sistema de secado por Hot Spray	47
FIGURA 12. Instrumentación para un secado mediante el método criogenico	49

	Pag
FIGURA 13. Contenido de humedad en equilibrio para la madera y el papel Kraft	52
FIGURA 14. Control de secado mediante lectura del agua condensada	53
FIGURA 15. Control de secado mediante medida de la resistencia	54
FIGURA 16. Multiplicadores de Myers	55
FIGURA 17. Afinidad del papel con el agua vs. temperatura	56
FIGURA 18. Carta de Piper	58
FIGURA 19. Vida de los devanados del transformador contra la temperatura	57
FIGURA 20. Circuito RC a. Circuito RC serie b. Circuito RC paralelo	67
FIGURA 21. Capacitancias en transformador con dos devanados	68
FIGURA 22. Capacitancias en transformador tridevanado.	68
FIGURA 23. El circuito UST	69
FIGURA 24. El circuito GST	69
FIGURA 25. El circuito GSTg	70
FIGURA 26. Grafica de tendencia para la $\tan\delta$ en un proceso de secado circuito UST	73
FIGURA 27. Grafica de tendencia para la $\tan\delta$ en un proceso de secado circuito GST	74
FIGURA 28. Grafica de tendencia para la $\tan\delta$ en un proceso de secado circuito GSTg	74
FIGURA 29. Procedimiento seguido para el ensayo de capacitancias y $\tan\delta$ en fabrica	89
FIGURA 30. a. Devanado de alta tensión contra baja tensión b. Devanado de alta tensión contra devanado de baja tensión c. Devanado de baja tensión contra devanado de alta tensión más tierra.	89
FIGURA 31.. Variación de la $\tan\delta$ respecto al voltaje aplicado	91
FIGURA 32. Variación de la $\tan\delta$ respecto al voltaje aplicado	91

	Fig.
FIGURA 33. Variación de las capacitancias con relación al voltaje aplicado	91
FIGURA 34.. Variación de la $\tan\delta$ respecto al voltaje aplicado	92
FIGURA 35.. Variación de las capacitancias con relación al voltaje aplicado	94
FIGURA 36.. Variación e la $\tan\delta$ en diversos transformadores de características similares.	95
FIGURA 37. Capacitancias para transformadores de características similares	96

Nota: Adicional a las graficas aquí citadas existen ocho graficas más de los resultados a los ensayos de secado y tangente delta del papel.



LISTA DE TABLAS

	Pag.
TABLA 1. Duración del ensayo de tensión inducida.	6
TABLA 2. Rangos de barrido recomendados para el oscilografo	14
TABLA 3. Resistencias usadas para desconectar terminales de linea	16
TABLA 4. Indice de polarización guia para la evaluación de la condición del transformador.	19
TABLA 5. Factores de corrección por temperatura para resistencia de aislamiento	20
TABLA 7. Relación del punto de rocío con la humedad en ppm	52
TABLA 8. Resultados aplicados para un ensayo de voltaje de paso	54
TABLA 9. Tiempo estimado para el aceite de transformadores con número de neutralización 0.25 KOH/g	56
TABLA 10. Expectativa de vida útil para transformadores	62
TABLA 11. Factor de potencia para diversos materiales	69
TABLA 12. Factor de potencia para equipos acoplados.	69

Nota: las tablas 13-21 son resultados de diversos ensayos realizados en SIEMENS de Colombia.

0. INTRODUCCION

En el transcurso del estudio de Ingeniería Eléctrica se estudiaron tres etapas básicas de la energía eléctrica, que son: Generación, Transmisión y la Distribución, analizando cada una de estas etapas y su importancia en el desarrollo de un país. En cada una de estas etapas existe un elemento de mucha importancia para poder efectuar dicho paso, que es el *Transformador*. En la Generación se utilizan transformadores que tienen como función recibir el voltaje del generador y elevarlo a valores de tensión mas apropiados. En la transmisión de energía eléctrica en nuestro país se utilizan transformadores de alta tensión, para poder transmitir la energía a grandes distancias, se trabaja con niveles de tensión de 115 KV, 230 KV y 500 KV. En la distribución de energía eléctrica se utilizan una gran cantidad de transformadores conocidos como Transformadores de Distribución, que tienen como función básica tomar la tensión de las redes de distribución del 13800 voltios generalmente y transformarla a niveles de tensión aplicables en la industria 440 y 220 voltios. Al notar la importancia de dicho elemento en el entorno eléctrico de un país se observo la necesidad de un trabajo de grado sobre el tema de los transformadores, pero al introducirse en dicha temática observé gran cantidad de etapas de importancia para profundizar, como son: Diseño eléctrico, Diseño mecánico, Fabricación ,Control de Calidad, transporte, mantenimiento, cargabilidad etc. Pretender analizar todos estos aspectos en un proyecto de grado es un trabajo muy extenso el cual implicaría mucho

tiempo de estudio, por lo cual tomé un aspecto del proceso de fabricación que es el Secado de la Parte Activa, un procedimiento poco conocido por la mayoría de los ingenieros que de alguna forma intervienen con transformadores.

Este trabajo fue realizado en la fabrica de transformadores **SIEMENS** Colombia con un tiempo de trabajo de 14 meses, donde se realizaron aproximadamente 20 procesos de secado a transformadores de potencia, llevando un control particular en cada etapa. En la parte de transformadores de distribución también se ensayos con diferentes perfiles de secado y características del horno.

Este documento consta de siete capítulos en los que se pretende comprender básicamente qué es el secado, para qué el secado y por qué la necesidad de implementar un control de secamiento de alta confiabilidad. En el primer capítulo del presente trabajo se describen los ensayos que se reralizan en fabrica a los aislamientos de los transformadores, describiendo su procedimiento y los cuidados básicos.

El capítulo dos del presente trabajo trata las pruebas eléctricas efectuadas a los aislamientos en campo, mostrando las más usuales, sus procedimientos y nos refiere a las normas habitualmente utilizadas

En los capitulos tres y cuatro del presente documentos se muestran los métodos de secado tanto en fabrica, como en campo. Además se hace un introductivo a los materiales constituyentes de la parte activa del transformador, y los controles básicos de secado .

En el capítulo cinco se trata la medida del factor de potencia a los aislamientos, se describe su fundamento teórico y se muestran las medidas que se efectúan en cada caso, se indica de forma clara la tendencia que tiene el valor de tangente delta durante un proceso de secado y se llega a un valor aceptable de dicha característica.

En el capítulo seis muestran diversos ensayos de secado efectuados a los diferentes materiales constituyentes de la parte activa en transformadores, dichos ensayos fueron efectuados en el laboratorio de SIEMENS Colombia.

El capítulo siete se tienen las conclusiones del presente trabajo, excluyendo el capítulo seis el cual tiene sus propias conclusiones.

Para realizar este documento se consultaron las normas del ICONTEC desarrolladas para transformadores, las normas ANSI C.57 DISTRIBUTION, POWER, AND REGULATING TRANSFORMER y la norma IEC 76 POWER TRANSFORMERS, al igual que documentos de entidades especializadas en la fabricación de transformadores, accesorios, o materiales para transformadores, como SIEMENS, ABB, PURAMIN, WEIDDMAN, GENERAL ELECTRIC y TRANSFORMER MAINTENANCE INSTITUTE. La otra gran fuente de información fue la norma TUF 1113 DRYING TRANSFORMERS AND REACTORS AS FROM 2 MVA, procedimiento propio de SIEMENS

Espero que éste trabajo permita tener una idea más clara sobre el proceso de secado y los controles sobre el mismo efectuados a los transformadores. También busco que el lector se introduzca en el tema de los transformadores y vea esta área de trabajo como una fuente de investigación para futuros trabajos de grado.

1. ENSAYOS ELECTRICOS REALIZADOS EN FABRICA A LOS AISLAMIENTOS EN TRANSFORMADORES DE POTENCIA.

Como se afirmará a lo largo del presente trabajo la vida del transformador es la vida de los aislamientos es conveniente chequear que dichos aislamientos estén en adecuadas condiciones una vez fabricado el transformador. Debido a que uno de los principales agentes que afecta la vida del transformador es la humedad contenida en ellos; se realizan una serie de ensayos que al ser efectuados en fabrica chequean en gran parte la calidad del proceso de secado a los cuales fueron sometidos.

1.1 ENSAYO DE TENSION APLICADA.

Este ensayo es de rutina para transformadores de potencia y sirve para comprobar si el aislamiento principal pertenece a la clase de aislamiento solicitado, donde el aislamiento principal está en:

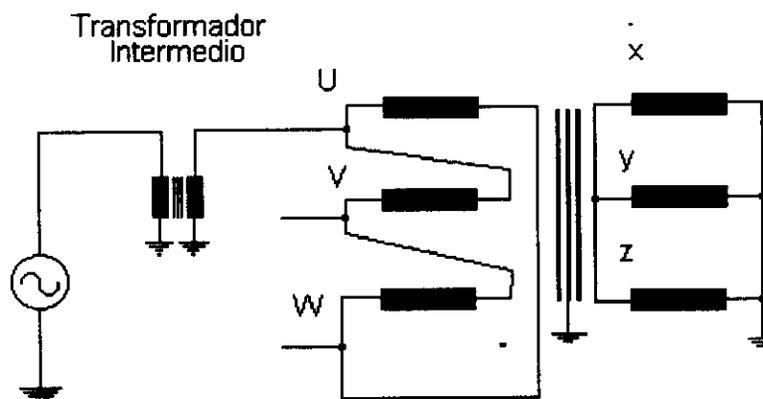
1. Aislamiento entre los devanados en el canal de dispersión principal.
2. Aislamiento en general entre devanado y tierra.
3. Conductores de conexión entre ellos y contra tierra.

En este ensayo no se excita el transformador en forma electromagnética normal si no que se aplica una tensión alterna de una fuente externa, el valor de dicha tensión de la prueba depende de la tensión de serie del devanado y esta fijada por normas.

1.1.1 Realización del ensayo de tensión aplicada.

1. Este ensayo se realiza con una tensión alterna monofásica, con una forma próxima a la sinusoidal y con frecuencia no menor al 80% de la frecuencia nominal.
2. El ensayo se debe iniciar con una tensión no mayor que 1/3 de la tensión de ensayo y se aumenta al valor apropiado, tan rápidamente como lo permita la indicación dada por el instrumento de medida, al finalizar la prueba la tensión se reduce rápidamente a menos de la tercera parte de su valor completo antes de desconectar.
3. La tensión apropiada, obtenida de una fuente externa se aplica sucesivamente durante 60 segundos, entre los devanados bajo ensayo y los demás, conectados con el núcleo, armazón y tanque del transformador, a tierra.

FIGURA 1.



**CIRCUITO PARA ENSAYO DE TENSION APLICADA
(FASE U)**

En el ensayo de tensión aplicada la potencia absorbida esta dada por:

$$PA = PD + PTI + PC \text{ (ECUACION 1).}$$

Donde;

PA: potencia real absorbida durante la prueba.

PTI: Pérdida en el transformador intermedio.

PC: Potencia capacitiva absorbida.

1.1.2 Equipos Utilizados en la Prueba: Para realizar el ensayo de tensión aplicada se requiere:

1. Fuente de tensión alterna: Para realizar la prueba de tensión esta fuente debe tener las siguientes características:

- * Fuente monofásica o trifásica conectada a monofásica.
- * De tensión alterna.
- * Frecuencia industrial (60 Hz)
- * Con tensión variable y regulada en forma continua (Sin sobresaltos)
- * Con una forma de onda sinusoidal acorde con las normas.

2. Transformador Intermedio:

- * Generalmente monofásico.
- * Conectado a tierra un terminal de AT y uno de BT
- * Con impedancia interna tan pequeña como sea posible, para evitar la elevación de la tensión a través de la carga capacitiva.

1.1.3 Recomendaciones del Ensayo:

1. Se deben drenar los Buchholz y aisladores
2. Alejar cuernos de fuga y conductores entre sí.
3. Cortocircuitar y aterrizar el secundario de los transformadores de corriente.
4. Duración del ensayo: 1 minuto
5. Se debe realizar con frecuencia industrial y valores de hasta el 80 % de la frecuencia nominal (50 Hz mínimo).
6. La precisión de la lectura depende del TP usado el cual debe ser de precisión.

1.1.4 Normas que cobijan el ensayo:

NTC 836	ELECTROTECNIA. TRANSFORMADORES . NIVELES DE AISLAMIENTO
NTC 837	TRANSFORMADORES. ENSAYOS DEL DIELECTRICO
IEC 76-3	POWER TRANSFORMERS
ANSI C.57.01	DRY TYPE DISTRIBUTION TRANSFORMERS

1.2 ENSAYO DE TENSION INDUCIDA.

La prueba de tensión inducida es un ensayo de rutina donde se chequea la estabilidad de terminales entre espiras contiguas y fases.

- a. Aislamiento entre conductores.
- b. Aislamiento entre capas de la bobina.

1.2.1 Realización del ensayo de tensión Inducida:

1. Consiste en aplicar a los terminales de baja o alta tensión del transformador bajo prueba, una tensión alterna de forma sinusoidal y con frecuencia incrementada sobre la normal, generalmente el doble de la frecuencia, por ser un valor apropiado para evitar que la corriente de excitación durante la prueba sea excesiva.

2. El valor de tensión aplicada esta dado en las normas.⁽¹⁾

3. La prueba debe iniciarse a una tensión no mayor que un tercio del valor de prueba, aumentándolo tan rápidamente como lo permita la indicación dada por el instrumento de medida. Al final de la prueba, la tensión debe reducirse rápidamente a menos de un tercio del valor de prueba antes de efectuar la desconexión.

4. La duración de la prueba depende de la frecuencia y esta dada por la ecuación:

(Ver tabla 1)

$$t = 120 \frac{f_n}{f_p} \text{ (ECUACION 2).}$$

(1) Valores de tensión para el ensayo de tensión inducida en la IEEE 12.C57-90-1993 o la IEC 76 sección 12 INDUCE OVERVOLTAGE WITHSTAND TEST (ROUTINE TEST).

TABLA 1.

FRECUENCIA (Hz)	DURACION DEL ENSAYO (s)
120	60
180	40
240	30
360	20
400	18
900	8
7200	1

DURACION DEL ENSAYO DE TENSION INDUCIDA

Donde;

- t : Tiempo, en segundos
 fn : Frecuencia nominal, en Hz
 fp : Frecuencia del ensayo, en Hz

Como se puede determinar, para una frecuencia del doble de la frecuencia nominal (120 Hz), el tiempo del ensayo es de 60 segundos. En la práctica se tienen determinados valores de frecuencia para ensayo de tensión inducida entre 120 Hz a 480 Hz, donde, podemos determinar que el tiempo mínimo de la prueba es de 15 segundos para una frecuencia de 480 Hz.

4. La tensión inducida entre los terminales de línea del devanado de alta tensión deberá ser igual a la tensión de prueba especificada por las normas, siempre y cuando la tensión entre las diferentes partes del mismo devanado no sea más del doble de la que aparece al aplicar la tensión nominal a los terminales de línea.

5. Cuando se trata de transformadores trifásicos, como en la mayor parte de los transformadores de potencia, se aplica la tensión de prueba a cada fase sucesivamente (es decir entre cada terminal y tierra) y, se desconectan las demás fases de modo que se evite la aparición de tensiones excesivamente altas entre terminales de línea adyacentes.

6. El circuito eléctrico de esta prueba es igual al de la prueba de tensión aplicada, particularmente cambia la fuente de tensión externa.

1.2.2 Consideración sobre la prueba: Se dice que un transformador de potencia pasa la prueba si durante el ensayo no se presentan fallas como:

- a. Ruptura por tensión.
- b. Inestabilidad de la tensión.
- c. Inestabilidad de la corriente.

1.2.3 Recomendaciones para realizar el ensayo:

1. Terminales y relé Buchholz drenados
2. Conductores y cuernos de fuga separados.
3. Secundarios de los TC cortocircuitados y aterrizados.
4. Se recomienda electrodos de arco, como esferas en las pasatapas, ya que ayudan a estabilizar la tensión externa.

1.2.4 Normas que cobijan el ensayo:

NTC 836

NIVELES DE AISLAMIENTO.

ENSAYOS DEL DIELECTRICO

IEC 76

POWER TRANSFORMERS

ANSI C57.12.00

GENERAL REQUIREMENTS FOR LIQUID IMMERSED
DISTRIBUTION POWER AND REGULATING
TRANSFORMERS

1.3 ENSAYO DE TENSION DE IMPULSO A TRANSFORMADORES DE POTENCIA.

La prueba de impulso a transformadores tiene por objeto verificar los niveles de aislamiento.

Para realizar este ensayo es necesario tener claros los siguientes términos.

1.3.1 Conceptos Generales de la prueba de impulso:

1.3.1.1 Coordinación de aislamientos: Es el proceso de correlacionar los esfuerzos de aislamiento de equipos eléctricos con sobretensiones esperados y con las características de dispositivos de protección.

1.3.1.2 Tensión no disruptiva: Es la tensión que el equipo eléctrico es capaz de soportar sin falla o descarga disruptiva, cuando es ensayado bajo condiciones específicas.

(2) 1.3.1.3 Nivel de aislamiento: Capacidad del aislamiento expresado en términos de la tensión disruptiva.

(2) Para mayor información sobre estos conceptos y el ensayo de impulso consultar la IEEE C57.12.98, GUIDE FOR TRANSFORMER IMPULSE TEST, o la norma NTC 3600 GUIA PARA LA REALIZACION E INTERPRETACION DEL ENSAYO DE IMPULSO A TRANSFORMADORES

1.3.1.4 Nivel de aislamiento Transitorio: Nivel de aislamiento expresado en kilovoltios del valor de cresta de la tensión no disruptiva para una onda transitoria específica; esto es, impulso tipo descarga o maniobra.

1.3.1.5 Nivel de aislamiento al impulso tipo descarga atmosférica: Nivel de aislamiento expresado en kilovoltios del valor de cresta de la tensión no disruptiva.

1.3.1.6 Nivel de aislamiento al impulso tipo maniobra: Nivel de aislamiento, expresado en kilovoltios del valor de cresta de la tensión disruptiva.

1.3.1.7 Nivel básico de aislamiento: Más conocido como el *BIL (Basic Insulation Level)*, es el nivel específico de aislamiento expresado en kilovoltios del valor de cresta de un impulso estándar tipo descarga atmosférica.

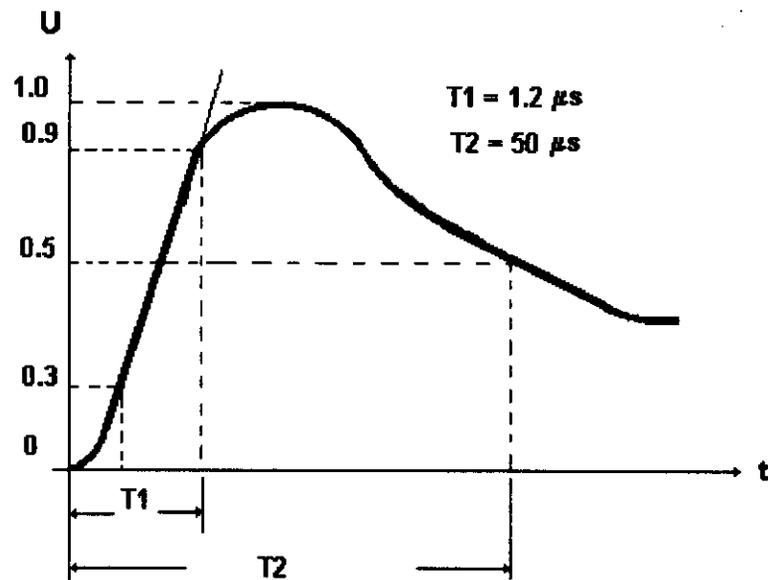
(2) 1.3.2 Formas de Onda de Impulso: Los ensayos de impulso son efectuados con formas de onda, que simulan aquéllas encontradas en funcionamiento. Se ha concluido que los disturbios en el sistema, a causa de rayos se pueden representar por tres formas de ondas básicas: ondas plenas, ondas recortadas y frentes de onda.

1.3.2.1 La Onda Plena: Si un disturbio causado por una descarga atmosférica (rayo), recorre alguna distancia a lo largo de la línea, antes de llegar a un transformador, esta forma de onda se aproxima a la mostrada en la figura 2. Esta es una onda que se eleva desde cero a un valor pico en 1.2 μ s y decae a la mitad del valor de cresta en 50 μ s. Esta es

⁽²⁾ Consultar IEE C57.12.98, GUIDE FOR TRANSFORMER IMPULSE TEST.
IEC 76 POWER TRANSFORMERS

generalmente referida como una onda de $1.2 \cdot 50 \mu s$. La parte de la onda entre cero y el valor de cresta es llamada *frente* y la parte después de la cresta es llamada *Cola*.

FIGURA 2.



TENSION DE IMPULSO DE ONDA COMPLETA DE $1.2 - 50 \mu s$

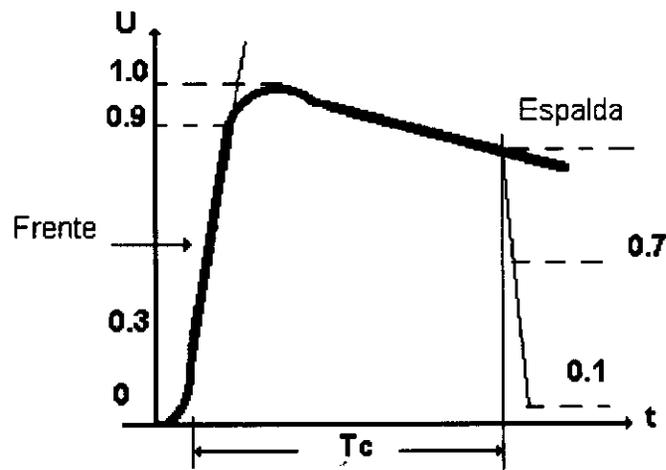
La onda plena, por su relativa larga duración, causa que se desarrollen mayores oscilaciones en el devanado y consecuentemente esfuerzos no sólo entre espiras, entre bobinas y el aislamiento a lo largo de los devanados, sino que se desarrolla también altas tensiones comparadas con los esfuerzos producidos por los ensayos a frecuencia industrial, al rededor de grandes porciones de los devanados y entre los devanados y tierra.

1.3.2.2 La onda recortada: Una onda que viaja a lo largo de la línea puede flamear sobre un aislador después de que la onda haya alcanzado el valor de cresta. Esta onda es

simulada por una onda recortada. la cual debe ser 15 % mayor en manigtud que la onda plena. Esta se representa en la figura 3.

La onda recortada, por ser de corta duración no permite desarrollar mayores oscilaciones por lo que generalmente no produce altas tensiones alrededor de grandes porciones de los devanados o entre devanados y tierra. Sin embargo, por ser está de gran. amplitud, se producen altas tensiones en el terminal de línea de los devanados y por los rápidos cambios de tensión, seguidos por las descargas en el entrehierro (Test Gap), se producen altos esfuerzos espira a espira y sección a sección.

FIGURA 3.



TENSION DE IMPULSO DE ONDA RECORTADA.

1.3.2.3 Frente de Onda: Si cae una descarga atmosférica fuerte directamente o muy cerca al terminal de línea, la onda de tensión puede elevarse rápidamente hasta que sea suavizada por una descarga, causando un repentino y muy ligero colapso de tensión.



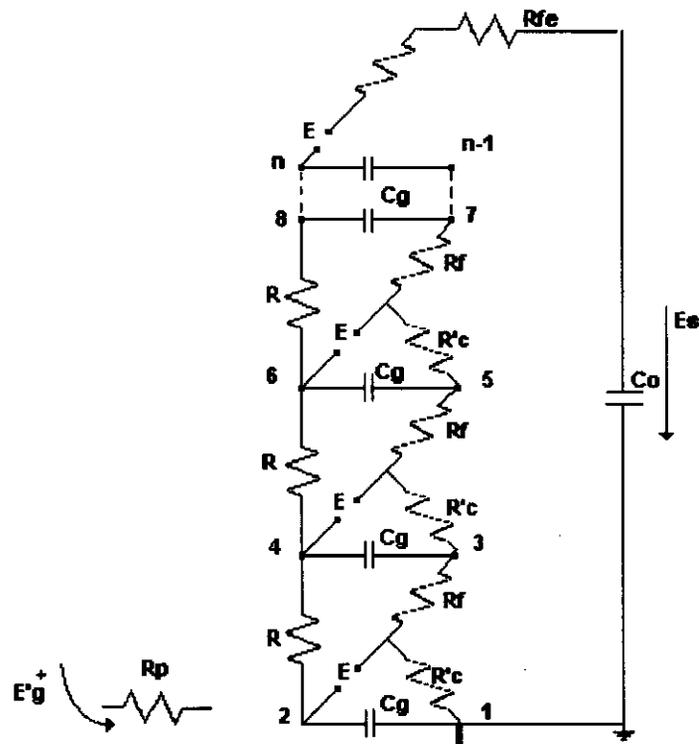
El frente de onda es aún más corto en duración, por lo tanto, produce menores tensiones entre el devanado y tierra a lo largo del devanado. Sin embargo, cerca al terminal de línea, se producen tensiones de gran amplitud entre el devanado y tierra, debido a la combinación de los rápidos cambios de tensión en el frente, seguidos por el flameo que producen las altas tensiones entre espiras y sección a sección.

1.3.3 Circuito de Prueba de Impulso: La simulación de sobretensiones se pueden crear por medio de generadores de impulso de tensión, éstos generadores de impulso pueden ser circuitos de Marx y circuitos de Goodlest. Normalmente se utiliza el generador de impulsos de Marx modificado, que consta de un conjunto de capacidades separadas por explosores esféricos cargados en paralelo a través de resistencias de carga, mediante una fuente de corriente directa, siendo descargados a través de la resistencia de frente y de cola, lo que proporciona una tensión de impulso elevado con una forma de onda dentro de las tolerancias normalizadas para aplicarlas al objeto de prueba, en la figura 4, puede observarse en diagrama esquemático del generador de Marx simplificado.

(3) 1.3.4 Mediciones de las Tensiones de Impulso: Para medir la amplitud y formas de ondas aplicadas que tengan un rango de valores para la cresta de 30 kV a más de 2800 kV, y una duración de 0.2 μ s a 250 μ s, se deben usar equipos de medición especiales. Para la detección de transientes extremadamente rápidos, se requieren oscilógrafos extremadamente rápidos, con alta velocidad de registro y buena precisión, y divisores de tensión con una respuesta adecuada.

(3) Para complementar sobre mediciones de las tensiones de impulso consultar la IEEE C.57.98-1993 GUIDE FOR TRANSFORMER IMPULSE TEST.

FIGURA 4.



GENERADOR DE MARX MODIFICADO

Debido a que los oscilógrafos normalmente usados tienen un rango de tensión de un poco de cientos de voltios, se deben usar divisores para reducir las altas tensiones de impulso a valores que se puedan aplicar al oscilógrafo.

Generalmente son tres tipos de divisores adecuados para la prueba de impulso. Ellos son resistivos, capacitivos y compensados. Como su nombre lo indica, el divisor de resistencia utiliza el principio que la tensión varía directamente con la resistencia, mientras que el divisor capacitivo, la tensión varía inversamente con la capacitancia. Los divisores compensados, son una combinación de resistencias, capacitancias y algunas inductancias.

Debido a las diferentes formas de ondas de impulso, que se deben registrar, existe un gran número de velocidades de barrido dentro del oscilógrafo. Los barridos recomendados para las diferentes formas de onda son:

TABLA 2.

	Rango de Barrido	Identificación del oscilograma
Tensión del Frente de Onda	2 μ s a 5 μ s	FOW
Onda recortada de tensión	5 μ s a 10 μ s	CW
Onda reducida de tensión	50 μ s a 100 μ s	RFW
Onda plena de tensión	50 μ s a 100 μ s	FW
Onda reducida de corriente	100 μ s a 600 μ s	RFCW
Onda plena de corriente	100 μ s a 600 μ s	FCW

RANGOS DE BARRIDO RECOMENDADAS PARA EL OSCILOGRAFO

1.3.5 Realización del Ensayo de Tensión de Impulso.

1. La tensión de impulso se debe aplicar al terminal de línea del devanado que se va a ensayar. En los transformadores polifásicos el ensayo se aplica sucesivamente a cada terminal de línea.

2. Se debe poner a tierra el tanque del transformador y los demás devanados diferentes al devanado sometido a ensayo, con el objetivo de tener seguridad personal y precisión de las medidas.

3. El terminal de línea del devanado bajo ensayo se conecta al generador de impulso y los demás se conectan a tierra, directamente o usando una impedancia de valor bajo. Si el comprador especifica que el transformador puede operar en servicio con el neutro conectado a tierra, éste se debe conectar a tierra. De lo contrario, puede no hacerse esta conexión.

4. *Cuernos de descarga*: los cuernos de descarga pueden ser retirados, o aumentar su espaciado para evitar descargas durante la prueba.

5. *Aplicación de la tensión*: A menos que se acuerde otra cosa entre comprador y productor, la tensión de ensayo será de polaridad negativa y será modificable durante la prueba. El generador de impulso se debe ajustar para suministrar una tensión correspondiente a la de nivel de ensayo a onda completa del terminal de línea del devanado bajo ensayo. Deben aplicarse dos ondas completas. Si durante la aplicación del impulso ocurre una descarga en los cuernos, se descarta la aplicación y se repite.

Las resistencias que se utilizan para conectar los terminales de línea a tierra, no deben exceder los siguientes valores:

TABLA 3.

Tensión nominal del sistema (kV)	Resistencia (ohmios)
345 o menor	500
500	400
765	300
1000	200

RESISTENCIAS USADAS PARA DESCONECTAR TERMINALES DE LINEA

1.3.6 Normas que cobijan el ensayo:

NTC 836	ELECTROTECNIA.TRANSFORMADORES NIVELES DE AISLAMIENTO
NTC 837	TRANSFORMADORES ENSAYOS DEL DIELECTRICO
NTC 3600	ELECTROTECNIA GUIA PARA LA REALIZACION E INTERPRETACION DEL ENSAYO DE IMPULSO A TRANSFORMADORES
IEEE C.57.98-1986	GUIDE FOR TRANSFORMER IMPULSE TEST
IEC 76	POWER TRANSFORMERS

2. ENSAYOS ELECTRICOS EFECTUADOS A LOS AISLAMIENTOS DE LOS TRANSFORMADORES EN CAMPO.

Es común realizar a un transformador ya trabajando una serie de pruebas, conocidas como Pruebas de Campo, por ser realizadas en el sitio de trabajo, con el objetivo de verificar el estado actual del transformador. Las pruebas eléctricas de campo que se realizan son:⁽⁴⁾

1. Resistencia de aislamiento.
2. Factor de potencia de los aislamientos.
3. Relación de Transformación.
4. Resistencia de los devanados.
5. Medición de la corriente de excitación.

Es conveniente realizar la medida de resistividad del terreno, pero en este trabajo no se describe dicha medición por no pertenecer al tema expuesto, debido a la temática del trabajo sólo se tratan los ensayos efectuados al aislamiento.

2.1 MEDIDA DE LA RESISTENCIA DEL AISLAMIENTO:

Se realiza aplicando un voltaje D.C durante un período de tiempo determinado (usualmente diez minutos), y permite determinar el estado que guardan los aislamientos eléctricos de un

⁽⁴⁾ Los ensayos de campo son tratados de forma amplia en IEEE DRAFT STANDARD GUIDE FOR DIAGNOSTIC FIELD TESTING OF ELECTRIC POWER APPARATUS.

transformador de tal manera que pueda soportar conforme a las normas, las tensiones nominales y de prueba.

Generalmente se mide en megaohmios, referidos a 20 °C, aplicando voltajes de diferentes valores. Los más usuales son: 500, 1000, 2500 y 5000 voltios,

La corriente de fuga que aparece en este ensayo esta formada por cuatro componentes a saber:

- ◆ Corriente capacitiva.
- ◆ Corriente de absorción dieléctrica.
- ◆ Corriente de conducción.
- ◆ Corriente de fuga.

Las lecturas de resistencia son graficadas de acuerdo al tiempo. Esta gráfica se conoce como curva de *absorción dieléctrica*.

A continuación se va determinar dicha curva para un transformador de 1870 KVA, con tensiones de 132/13.8 kV, descrito en el ⁽⁵⁾ TRANSFORMER MAINTENANCE INSTITUTE, T.M.I.

⁽⁵⁾ S.D MAYES: TMI. TRANSFORME MAINTENANCE INSTITUTE.

TIEMPO(MINUTOS)	PRIMARIO-GND (MΩ)	RIMARIO-SEC (MΩ)	ECUNDARIO-GND(MΩ)
1/4	600	450	300
1/3	950	850	650
1/2	1150	1300	1100
1	1250	1550	1400
2	1600	2250	2250
3	1775	2750	2950
4	1975	3250	3250
5	2050	3500	3500
6	2250	3750	3750
7	2350	4000	4000
8	2450	4250	4100
9	2450	4250	4100
10	2450	4250	4250

Los datos obtenidos se grafican en papel logarítmico.

También es posible calcular el índice de polarización (*Polarization Index, PI*).

$$P.I = \frac{R(10 \text{ minutos})}{R(1 \text{ minuto})} \quad (\text{ECUACION 3}).$$

Esta es una medida cuantitativa del estado de los aislamientos del transformador ver tabla

4.

TABLA 4.

CONDICION	INDICE DE POLARIZACION (P.I)
PELIGROSO	Menor a 1.0
MALO	1.0 a 1.1
CUESTIONABLE	1.1 a 1.25
REGULAR	1.25 a 2.0
BUENO	Mayor a 2.0

INDICE DE POLARIZACION GUIA PARA LA EVALUACION DE LA CONDICION DEL TRANSFORMADOR

Con estos se puede determinar el índice de polarización para el transformador del ejemplo:

P.I : Primario - tierra \Rightarrow 1.96

P.I : Primario - secundario \Rightarrow 2.94

P.I : Secundario - Tierra \Rightarrow 3.04

De acuerdo con estos valores y los sugeridos por el T.M.I, el transformador está en buenas condiciones.

Es importante realizar el ensayo a 20 °C, y en los casos donde no es posible realizarlo a esta temperatura se deben aplicar los factores de corrección expuestos en la tabla 5.

TABLA 5.

°C	°F	Factor de Corrección
0	32	0.25
5	41	0.36
10	50	0.50
15	59	0.72
20	68	1.00
30	86	1.98
40	104	3.95
50	122	7.85

FACTORES DE CORRECCION POR TEMPERATURA PARA RESISTENCIA DE AISLAMIENTO

En la práctica se efectúa la medida de resistencia de aislamientos con un aparato llamado *Megger*, el cual se explica a continuación:

2.1.1 Megger: Es un aparato que sirve para medir resistencia del aislamiento, en los equipos de alta tensión.

El aparato es un generador de corriente directa con una escala de lectura, graduada en megohms, que mide los miliamperes que circulan por el aislamiento, al aplicarse la tensión de corriente directa del generador del propio aparato. El generador se puede mover a mano o en forma motorizada, este último tipo es el más utilizado, debido a que la aplicación de tensión durante la prueba es más uniforme que el tipo manual.

2.1.2 Pruebas de Aislamiento a transformadores:

2.1.2.1 Verificar el estado del Megger: Esto se logra con el ajuste del cero y el infinito. El primer caso se logra conectando las puntas de prueba en cortocircuito y aplicando la tensión del generador.

2.1.2.2 Nivelar el instrumento: El instrumento debe operar perfectamente nivelado, para lo cual tiene en su base cuatro patas con tornillos que al girarse, ajustan la altura de cada esquina de la caja.

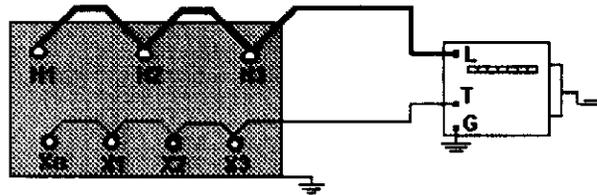
2.1.2.3 Pruebas con Megger: Las mediciones se hacen en la siguiente forma:

AT - BT + T (Alta tensión contra baja tensión mas tierra).

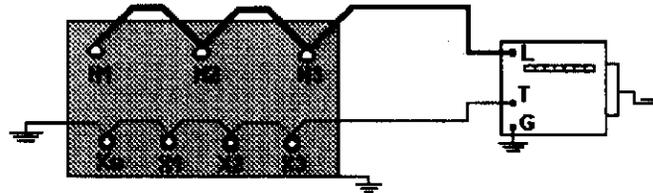
BT - AT + T (Baja tensión contra alta tensión más tierra).

AT - BT (Alta tensión contra baja tensión).

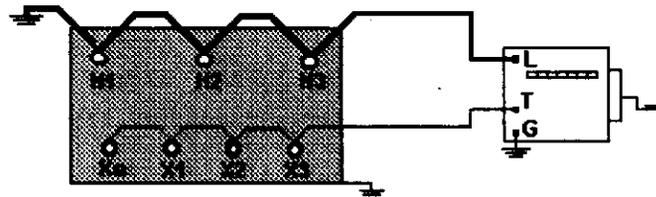
FIGURA 5.



a. DEVANADO DE ALTA TENSION CONTRA BAJA TENSION (H-X)



b. DEVANADO DE ALTA TENSION CONTRA DEVANADO DE BAJA TENSION MAS TIERRA (H-X+T)



c. DEVANADO DE BAJA TENSION CONTRA DEVANADO DE ALTA TENSION MAS TIERRA (X-H+T)

2.2 FACTOR DE POTENCIA DE LOS AISLAMIENTOS:

Esta prueba proporciona una indicación de la calidad de un aislamiento sobre todo en lo referente a la detección de humedad y otros contaminantes. Como lo que se mide es una relación de pérdidas, el factor de potencia es independiente de la cantidad de aislamiento bajo prueba.

Experimentalmente esta prueba es más confiable que la de resistencia de aislamiento. A diferencia de la prueba anterior, el aislamiento se somete a una tensión alterna. Como el aislamiento de un aparato es en sí, dieléctrico de un capacitor por una resistencia R en

paralelo con una capacidad C , el factor de potencia de un aislamiento es la relación de la resistencia a la impedancia.

También es conocido el factor de potencia de los aislamientos como la relación entre la potencia en vatios disipada por el material y el producto de la tensión senosoidal eficaz por la corriente, en voltio-amperios.

El factor de potencia se mide aplicando una tensión al aislamiento y midiendo la corriente A y la potencia W de pérdida que a su vez provoca el calentamiento, que lo va degradando.

El valor ideal debe estar por debajo de 0.5 % a 20 °C. Los transformadores en operación que tengan un valor más alto que el 2 %, deben ser sacados de servicio para investigar mediante otros ensayos las causas de este valor alto de factor de potencia y proceder en consecuencia a corregir la anomalía identificada.

En la realización de este ensayo se deben tener en cuenta aspectos como:

- ◆ El tipo de equipo bajo ensayo.
- ◆ Temperatura del aislamiento en medición.
- ◆ La temperatura ambiente.
- ◆ La tensión aplicada (Generalmente 10 kV).

Este ensayo será profundizado en el capítulo de control de secamiento, ya que es la base teórica del control por medición del factor de potencia de los aislamientos.

2.3 NORMAS QUE RIGEN LOS ENSAYOS DE CAMPO:

Las pruebas realizadas en campo estan regidas por las mismas normas que los ensayos realizados en fabrica, pero es usual someter los ensayos unicamente a las normas ANSI, que se citan a continuación:

Como norma general se consulta: **IEEE C 57.12.90-1993**

IEEE Standard Test Code for Liquid-Immersed Distribution, Power, and Regulating Transformers and , IEEE Guide for Short-Circuit Testing of Distribution and Power Transformers.

Guiándose básicamente de las siguientes partes:

1. **Resistence Measurements (5-7)**
2. **Polarity and phase-relation tests (7-12)**
3. **Ratio Tests (12-14)**
4. **No-load losses and excitation current**
5. **Insulation power-factor tests**
6. **Insulation resistance tests**

Ocasionalmente suele ser utilizada la norma IEC 76 Power Transformers.

3. METODOS DE SECADO DE LA PARTE ACTIVA UTILIZADOS EN FABRICA PARA TRANSFORMADORES DE POTENCIA .

En la fabricación de transformadores existen una gran cantidad de etapas a saber:

1. Diseño mecánico.
2. Diseño eléctrico.
3. Corte de núcleo
4. Trefilado y laminado del alambre.
5. Aislamientos.
6. Fabricación de bobinas
7. Armado.
8. Secado de la parte activa
9. Terminado y encubado.
10. Llenado.
11. Ajuste final.
12. Ensayos eléctricos y mecánicos.
13. Despacho y transporte.

Cada una de las etapas aquí citadas esta subdividida en otra gran cantidad, y como el objetivo de este trabajo es el secado de la parte activa nos centramos en esta etapa.

El secado de la parte activa es una fase de gran importancia en la fabricación de transformadores, ya que en gran parte determina la vida de los aislamientos y como es bien sabido: *"La vida del aislamiento es la vida del transformador"*.

El secado del transformador tiene como objetivo extraer la humedad contenida en los aislamientos y adecuarlos a futuros esfuerzos eléctricos que se generan en fabrica y en el propio funcionamiento del transformador. A continuación se hace mención a los efectos del agua en el transformador.

3.1 EFECTOS DEL AGUA SOBRE EL SISTEMA AISLANTE DEL TRANSFORMADOR:

El agua contenida en un transformador de potencia generalmente proviene de:

- a. La humedad residual contenida en el aislamiento, luego del secado del transformador en fabrica.
- b. La humedad absorbida por el aceite desde la atmósfera con la cual está en contacto.
- c. El agua producida durante las reacciones de oxidación del aceite dieléctrico y la celulosa del papel aislante.

El agua, considerada como compuesto químico activo, tiene las siguientes características:

Compuesto Polar: Es atraída hacia uno de los polos y, por tanto, conduce, la corriente eléctrica.

Elemento Fuertemente Electropositivo: Es atraída hacia los electrodos cargados negativamente. De modo que cuando el agua se encuentra presente en el aceite del transformador tenderá a concentrarse en el área energizada del equipo.

Solvente Universal: El agua presente en el aceite del transformador, se asocia a los ácidos orgánicos que se forman de la oxidación de los hidrocarburos y contribuye así a hacer más conductor a dicho aceite.

Catalizador Activo: Contribuye a oxidar el aceite del transformador y la celulosa del papel.

Sustancia Corrosiva: Corrosiva frente a la mayoría de los metales y en especial a la mayoría de las aleaciones ferrosas en los núcleos y radiadores de los transformadores.

3.2 UBICACION DEL AGUA CONTENIDA EN EL TRANSFORMADOR:

A continuación se presentan los diversas formas en que el agua se nos presenta en el transformador:

3.2.1 Agua Disuelta en el seno del aceite del transformador: Está contenida en forma molecular en el aceite y depende de la temperatura a la cual éste se encuentra sometido.

Para conocer éste contenido se realiza al aceite el ensayo conocido como: **CONTENIDO DE AGUA.**⁽⁶⁾

Este contenido de agua de saturación se puede disminuir considerablemente mediante métodos apropiados de secado, pero técnicamente es imposible obtener un aceite para transformador completamente seco o libre de agua.

3.2.2 Agua suspendida en el aceite del transformador: Cuando un aceite de transformador se encuentra saturado de agua a una cierta temperatura y se le enfría hasta una temperatura marcadamente menor, el exceso de agua que contenía a la temperatura mayor, se condensa y queda suspendida en el seno del aceite en forma de pequeñas gólicas. Si la temperatura sigue bajando, esas gólicas aumentan de tamaño, se unen entre si y finalmente se precipitan hasta el fondo del recipiente que contiene el aceite. Ahora bien, el agua suspendida es mucho más conductora que el agua disuelta, por tanto un aceite de transformador que contiene agua suspendida siempre mostrará una muy baja tensión de ruptura.⁽⁷⁾

3.2.3 Agua depositada en el fondo del transformador: Cuando en el aceite se suceden cambios alternos de temperatura, subidas y bajadas considerables en forma periódica y mientras el aceite está en contacto con la atmósfera, es posible que el aceite tome agua de esta y por el proceso de disolución y condensación la deposite en el fondo del transformador. El agua allí depositada no tiene mayores efectos inmediatos en el comportamiento o eficiencia del transformador, no obstante su presencia **oxida** el tanque

⁽⁶⁾ Ensayo realizado al aceite de transformadores conocido con el nombre de CONTENIDO DE AGUA, sujeto a la norma ASTM D-1315 ó D-1533.

⁽⁷⁾ Ensayo de tensión de ruptura, se rige a la norma ASTM D-877

del transformador, contribuye a la **degradación** del aceite y propicia el crecimiento de las bacterias que aceleran los procesos antes mencionados.

3.2.4 Agua asociada a los ácidos orgánicos derivados de la descomposición del aceite: La atracción de los grupos polares electronegativos del aceite y las electropositivas del agua hace que una considerable cantidad de agua permanezca suspendida o asociada a dichos ácidos. Esta asociación agua ácido orgánico es buena conductora de electricidad y por ello su presencia en los aceites para transformadores baja la tensión de ruptura de dichos aceites.

3.2.5 Agua absorbida en la celulosa del papel y la madera: La celulosa por ser un compuesto higroscópico posee propiedades absorbentes. En efecto, se ha comprobado que la celulosa tiene una afinidad por el agua que es 600 a 800 veces mayor que la correspondiente a la del aceite para transformadores. Esto significa que las condiciones de equilibrio entre contenido de humedad de la celulosa y del aceite para transformadores, es: 99,75 % de la humedad total del sistema estará contenida en la celulosa y sólo el 0,25 en el aceite.

En este trabajo se explican los diversos métodos de secado y control de secamiento de la parte activa, lo cual excluye los métodos de secado del aceite para transformadores.

3.3 MATERIALES ASOCIADOS AL PROCESO DE SECADO DE LA PARTE ACTIVA:

Antes de entrar en los métodos de secado, vale la pena conocer los diversos materiales que influyen en el secado y su utilización en la parte activa del transformador:

3.3.1 Papel PRESSPAN: Papel fabricado a base de celulosa, esta constituido por un gran número de capas finas, prensadas fuertemente mientras se hallan húmedas, para hacerlas bien densas. Las hojas a base de fibras finas de hasta 1 mm. de longitud, se denominan papeles, si su espesor no excede de unos 0,2 mm. y a partir de este grueso se denominan cartones.

Los papeles son anisótropos, es decir, sus propiedades son distintas del largo, del ancho o del espesor. Sus propiedades dieléctricas dependen altamente del contenido de humedad, volumen de poros y restantes componentes e impurezas.

Los papeles celulósicos secos tienen pérdidas dieléctricas reducidas ($\tan\delta$, aproximada 0,003).

En estado de equilibrio con el ambiente que los rodea, los productos celulósicos (Presspan, Kraft, madera KP), absorven del 5 al 12 % de humedad. El secado completo puede provocar una contracción de aproximadamente 1 % en sentido de la laminación, 2 % en sentido transversal (a lo ancho) y 5 % en su espesor.

El presspan usado en transformadores de potencia esta regido bajo la norma DIN 7733 y la VDE 0315 .

En el capítulo 6 se describen los ensayos realizados en el laboratorio SIEMENS de Colombia, donde se determina el tiempo de secado para el presspan a diferentes condiciones de presión y temperatura.

3.3.2 Papel KRAFT: Papel a base de celulosa utilizado para aislar el alambre trefilado y conexiones del transformador. Sus especificaciones técnicas están dadas en la norma. ASTM D 1307-87 .

3.3.3 Madera KP: Utilizada en la fabricación de apantallamientos, separadores, listones, etc. Es un compuesto a base de celulosa. En el capítulo 6 se describen los ensayos realizados en el laboratorio de **SIEMENS** de Colombia donde se determina el tiempo de secado para diferentes condiciones de temperatura y presión.

3.4 METODOS DE FABRICA PARA EL SECADO DE LA PARTE ACTIVA:

3.4.1 Método de secado por Calentamiento : Este método de secado se realiza a presión atmosférica, por lo cual es necesario pasar de los 100 °C, ya que de otro modo la evaporación de agua es reducida. Este secado se realiza por regla general mediante una corriente de aire caliente. El proceso suele constar de tres etapas:

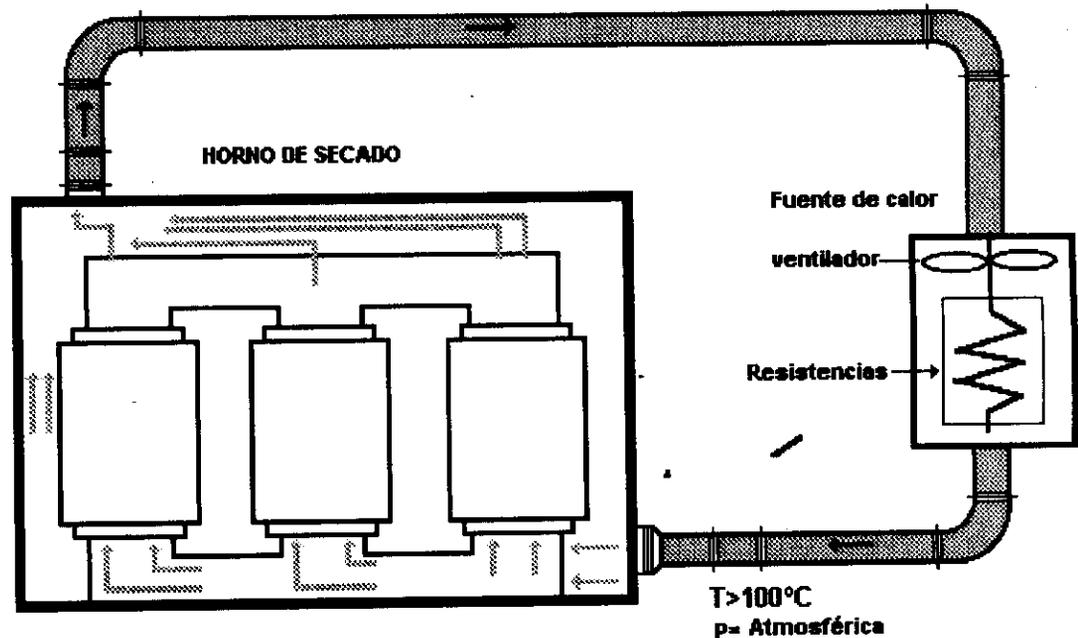
1. Secado Superficial.
2. Secado interno.
3. Cambio de la resistencia del material sólido.

Secado superficial: Esta etapa depende principalmente del estado previo de los aislamientos, la velocidad de aire de secado y la temperatura, la cual debe ser mayor a los 100 °C, pero sin exceder 160 °C.

Secado Interno: Después de secar la parte externa, el calor empieza a penetrar en los bobinados secando la parte interna de ellos hasta una temperatura adecuada para encubar el transformador.

Cambio de la resistencia del material sólido: Esta etapa es básicamente para control del secado de la parte activa, dicha resistencia debe ser mucho más alta que la resistencia antes del secado.

FIGURA 6.



SECADO POR CALENTAMIENTO

Condiciones y cuidados para un secado por calentamiento:

1. Se requieren instalaciones con horno de circulación de aire caliente, lo cual hace que sea un método costoso y exclusivo para fabrica.

2. Para que el calentamiento sea correcto, se debe controlar un horno con temperatura homogénea, lo que implica sistemas de instrumentación que midan la temperatura en diversos puntos del horno y controladores que actúen para mantener la temperatura homogénea.
3. Hay que tener especial cuidado en no sobrecalentar el papel, cuando existan puntos elevados de temperatura.
4. Mediante la aplicación de calentamiento no se extrae completamente la humedad, nos vemos muy afectados por la humedad relativa del medio ambiente.
5. Es necesario trabajar con temperaturas elevadas (más de 120 °C), lo cual lo hace un método peligroso tanto para los operarios, como para el transformador.

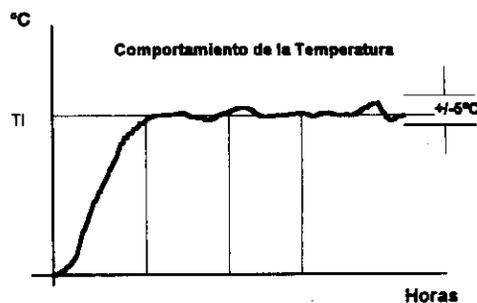
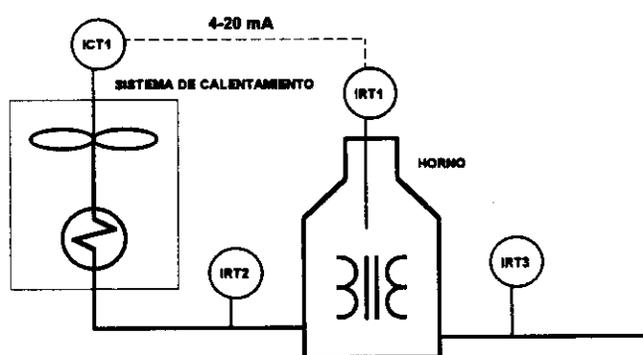


FIGURA 7.
INSTRUMENTACION BASICA PARA UN
PROCESO DE SECADO POR CALENTAMIENTO.

- ICT1 Indicador y Controlador de la Temperatura en el punto 1.
- IRT1 Indicador y Registrador de la Temperatura en el punto 1.
- IRT2 Indicador y Registrador de la Temperatura en el punto 2.
- IRT3 Indicador y Registrador de la Temperatura en el punto 3.

Nota: Simbología utilizada bajo la norma ISA 5.5

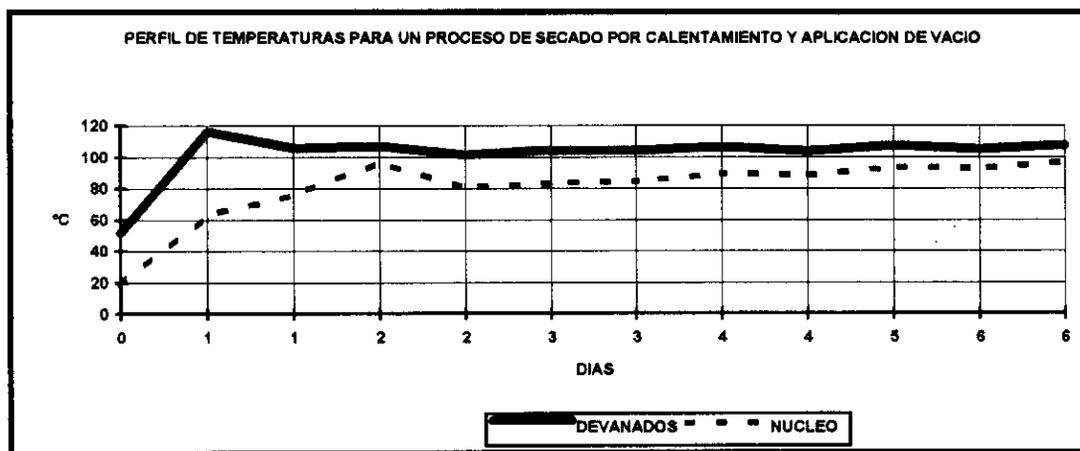
Este método de secado no es muy aplicado en transformadores de potencia, por ser demasiado lento.

3.4.2 Secado por Calentamiento y Aplicación de Vacío: Como su nombre lo dice este método de secado es una técnica en la que además de calentar el transformador, se le aplica presión de vacío que debe ser por lo menos de 0.375 Torr , con condiciones específicas de temperatura en el núcleo y devanados.

Calentamiento: Primera etapa del proceso de secado en la cual se acondiciona el transformador al secado, calentando previamente los devanados y el núcleo hasta llegar a una temperatura máxima del horno de 120 °C de forma homogénea, teniendo en cuenta que dicha etapa de calentamiento se realiza bajo presión atmosférica. Una vez concluida la etapa de calentamiento, con las condiciones mínimas establecidas por la norma TUF 1113, se aplica presión de vacío.

Secado: Esta etapa comienza una vez el transformador se ha calentado y está bajo presión de vacío, en esta etapa se extrae la humedad contenida en el transformador, la cual depende básicamente del peso de los aislamientos. En la gráfica 8 se observa el perfil de temperaturas que se deben llevar durante este tipo de secado, vale la pena aclarar que la disminución de temperatura que se presenta en dicho perfil se debe a que en ese momento se aplica la presión de vacío, para pasar a la etapa de secado.

GRAFICA 8.



CONDICIONES MINIMAS ESTABLECIDAS POR NORMA
NORMA TUF 1113

T DEVANADOS: 100 °C

T NUCLEO: 90 °C

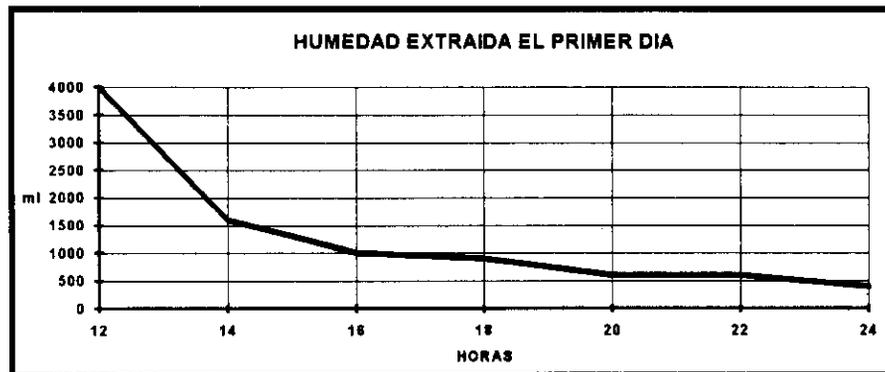
PRESION: 0.5 mB

PERFIL DE TEMPERATURA PARA UN PROCESO DE SECADO CON CALENTAMIENTO Y APLICACION DE VACIO.

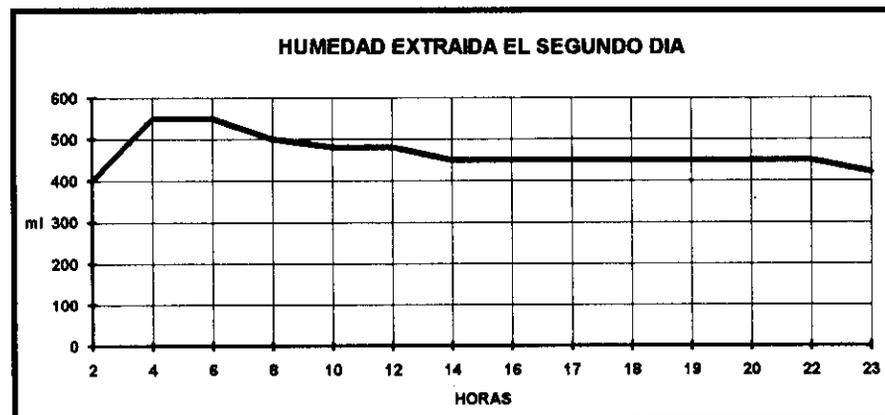
Este método de secado es muy utilizado en fabrica (Utilizado en SIEMENS de Colombia), debido a que es muy confiable y se logra extraer gran cantidad humedad, logrando contenidos de humedad por kilogramo inferiores al 1 %. En las gráficas siguientes se observa la forma en que se extrae la humedad a un transformador de 34/45/56 MVA, serie 115 kV y con un peso de aislamientos de 2500 kg.⁽⁸⁾

⁽⁸⁾ Se noto en la práctica que el indice de humedad para el presspan utilizado en transformadores de potencia tiende a una valor de 7 a 8 ml/Kg, lo que quiere decir que un transformador con un peso en aislamientos de 2000 kgs, se extraera aproximadamente 16 litros de agua.

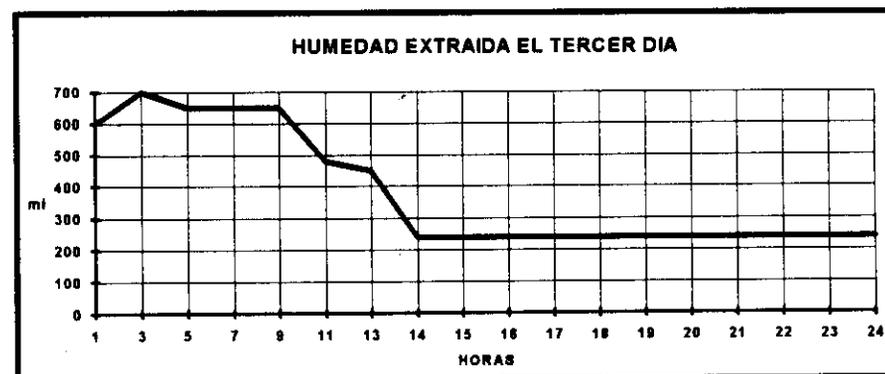
GRAFICA 9.



a. HUMEDAD EXTRAIDA EL PRIMER DIA



b. HUMEDAD EXTRAIDA EL SEGUNDO DIA



c. HUMEDAD EXTRAIDA EL TERCER DIA

Como se puede observar en las gráficas 9 a,b y c, la humedad contenida en el transformador tiende a disminuir. Este método además de ser muy eficiente es bastante rápido,

Este método de secado tiene los siguientes cuidados y limitaciones:

1. Método de secado solo aplicable en fabrica por requerir de horno y bomba de vacío de alto caudal generalmente se usan bombas ROOTS (ver anexo 1).
2. Se debe implementar un horno con temperatura homogénea y donde se tenga completo control tanto de la temperatura como de la presión.
3. Se debe tener personal calificado para manejar dicho proceso debido a que se requieren condiciones especiales de temperatura y presión durante el secado.
4. Para disminuir los elevados costos de energía eléctrica, se suele utilizar como elemento de calentamiento aceite térmico en cambio de resistencias eléctricas.

3.4.3 Método de Fase de Vapor (Vapotherm):⁽⁹⁾ El secado por el método del Vapotherm fue desarrollado por la General Electric Company utilizado por la mayoría de fabricantes para suplir las exigencias de diseño en particular para unidades de EHV. El principio básico de secado no difiere del tradicional calentamiento y vacío. Sin embargo el método de calentamiento es diferente.

⁽⁹⁾ Método de secado tomado de: T.M.I, TRANSFORMER MAINTENANCE INSTITUTE; DRYING TRANSFORMERS.

Ciclo de Calentamiento: El interior del transformador es colocado en un tanque de vacío que es evacuado hasta un nivel aproximado de presión 35 mmHg (35 Torr).

El fluido es una clase especial de kerosene con un punto de ebullición mucho más alto que el del agua 100 °C (con una presión aproximada de 100 mmHg absoluta), e introduciendo dentro de la cámara de vacío sosteniendo la parte activa para que seque.

El solvente caliente vaporizado y recondensado en las superficies mas frías bien sea metal o papel penetra en las partes frías del aislamiento a base de celulosa. El fluido entonces entrega su calor de vaporización al objeto en el cual este se condensa causando un aumento de temperatura.

La transferencia de calor es uniforme y en un porcentaje alto. El calor latente del solvente rápidamente incrementa la temperatura de la parte activa cuando sus vapores se condensan.

Estos vapores del solvente son extraídos y recuperados en los condensadores para reutilizarlos y completar el proceso. La presión es reducida a menos de 1 mmHg absoluto. Con el rápido incremento de temperatura, la presión extrae la humedad de la parte activa.

Cuando el tiempo es la preocupación más importante, éste método es capaz de remover la humedad rápida y eficientemente.

Adicionalmente, las ventajas incluyen un control casi perfecto de las temperaturas del proceso y una acción limpiadora de la estructura impregnada con aceite; además, deja menos humedad residual que en cualquier otro método. Como es de esperarse se requiere un equipo especial para utilizar este sistema. Es utilizable para transformadores de media y



alta potencia. Sin embargo, es limitado por el alto costo y la complejidad del sistema. Este método de secado es solo utilizable en fabrica.

4. METODOS DE SECADO UTILIZADOS EN CAMPO Y CONTROLES DE SECAMIENTO

4.1 METODO CONVENCIONAL DE SECADO EN CAMPO:

En campo no es muy usual secar la parte activa de los transformadores, el método más utilizado es hacer **Recircular Aceite Caliente**; pero dicho método de secado extrae básicamente la humedad contenida en el aceite. Debido a su amplio uso se explica en este trabajo.

Existe actualmente una tendencia muy marcada a efectuar el mantenimiento preventivo de los transformadores de potencia en los sitios en donde estos se encuentran instalados y además a efectuarlo con el transformador energizado. En todo caso, el equipo a utilizarse en el mantenimiento dependerá en gran medida del tipo de operación que se ha decidido realizar. Así, por ejemplo, si se trata de un simple secado del aceite, se deberá utilizar una planta de vacío; si se requiere eliminar el lodo del aceite, se utilizarán filtros de arcilla o filtros micrométricos de porcelana, y si por el contrario se desea eliminar la humedad y el lodo depositados en el transformador se deberá utilizar una planta de mantenimiento compacta que incluya las facilidades siguientes: bombas de recirculación, calentadores, secador al vacío, filtros de arcilla o cualquier otro material absorbente, dosificador de inhibidor, filtros micrométricos, tanques auxiliares, mangueras flexibles y todos los

instrumentos de indicación, regulación y análisis necesarios para vigilar o verificar la operación. En la figura 10 se muestran los principales componentes de esas instalaciones.

4.1.1 Bombas de Recirculación: Las bombas de recirculación deben ser de una capacidad suficiente para mantener el flujo deseado, contra las caídas de presión originadas por los filtros y los inyectores que pudieran incluirse en el sistema.

4.1.2 Calentadores: Los calentadores deben estar dimensionados para mantener una temperatura cercana a los 100 °C en todo el sistema.

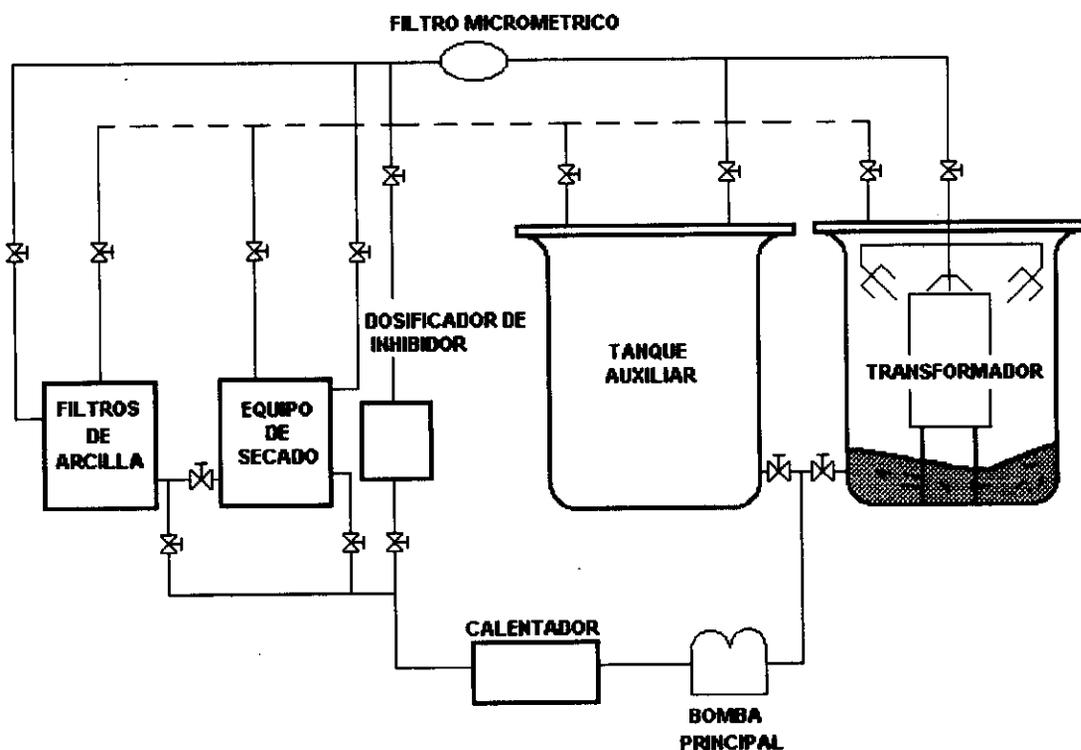
4.1.3 Equipo de Secado: El equipo de secado incluido debe ser capaz de disminuir la humedad (agua) en el aceite hasta niveles inferiores a las 5 ppm en peso. El equipo de secado generalmente incluido en las plantas de tratamiento de aceite dieléctrico consiste en un evaporador al vacío. ⁽¹⁰⁾

En el pasado reciente y aún en la actualidad se han utilizado los filtros para secar el aceite dieléctrico; no obstante, esto no es posible en las plantas compactas que estamos describiendo.

4.1.4 Filtros de Arcilla: Los filtros de arcilla deben contener una cantidad de arcilla activada suficiente para tratar todo el aceite del transformador, sin tener que remover el material usado en medio de la operación de mantenimiento. Por lo general se requieren de 6 a 12 Kg, de arcilla activada por cada 100 Kg de aceite, cifras que pueden ser utilizadas

⁽¹⁰⁾ Información tomada de: J.R.CABELLO : MANTENIMIENTO PREVENTIVO DE TRANSFORMADORES DE POTENCIA.

FIGURA 10.



EQUIPOS UTILIZADOS EN EL MATENIMIENTO DE TRANSFORMADORES EN CAMPO.

para calcular el tamaño de los filtros que se incluirán en la plantas de mantenimiento preventivo.

Es importante tener en cuenta los factores que afectan el consumo de arcilla:

- * Velocidad del flujo del aceite a través de la arcilla.
- * La temperatura del aceite
- * La acidez inicial del aceite versus la acidez final deseada.
- * La granulometría de la arcilla utilizada en el proceso

4.1.5 Dosificador de Inhibidor: El dosificador de inhibidor es una facilidad muy importante dentro de la planta de tratamiento de aceite dieléctrico, pues mediante ella se restituye la cantidad de inhibidor de oxidación que se consumió durante el tiempo en el que el aceite permaneció en uso y la que pudo gastarse durante el proceso de mantenimiento del transformador.

El contenido final del inhibidor presente en el aceite no debe ser mayor de 0,3% en peso, ya que concentraciones mayores pueden bajar la *Resistencia de impulso del aceite*.

4.1.6 Filtros Micrométricos: Preferiblemente de porosidad igual o menor de 0,5 micrón, se utilizan en primera instancia para separar sólidos y gotas de agua que pudieran permanecer suspendidas en el aceite, con lo cual se prolonga la vida útil de la arcilla. El otro filtro micrométrico generalmente se instala luego de los filtros de arcilla y después del sistema de inyección del inhibidor, con lo cual se logra eliminar las partículas que pudieran desprenderse de los filtros de arcilla o del antioxidante no disuelto.

4.1.7 Tanques Auxiliares: Dichos tanques son particularmente útiles para la prueba inicial del equipo de tratamiento y para el establecimiento de las condiciones de operación, con las cuales se quiere operar dicho equipo antes de involucrar al transformador en el proceso de mantenimiento.

4.1.8 Mangueras: Deben ser de un material resistente a la acción del aceite caliente y a las máximas presiones utilizadas en el proceso.

4.1.9 Instrumentación: Se deben incluir medidores y controladores de presión, temperatura, humedad y resistencia dieléctrica del aceite. Deben ser revisados y calibrados antes de iniciar cualquier mantenimiento y cuando sea necesario se sustituyen aquellos instrumentos que no ofrezcan la adecuada confiabilidad.

4.2. CALENTAMIENTO POR CORTOCIRCUITO, RECIRCULACION Y APLICACION DE VACIO.

Este método consiste en aplicar a los devanados y el aceite colocando en cortocircuito el devanado de baja tensión y aplicando un voltaje apropiado en el devanado de alta tensión.

El secado se efectúa realizando el cortocircuito y se recircula al mismo tiempo el aceite a través de un equipo de tratamiento por termovacío. Una vez alcanzados los niveles de temperatura deseados (máxima 95 ° C en los devanados y máxima en el aceite de 85 °C), se desconecta la alimentación del cortocircuito, se evacua todo el aceite y se aplica vacío al tanque del transformador. Esta operación se repite cuantas veces sea necesaria hasta alcanzar el nivel de humedad deseado en la celulosa en condiciones de equilibrio.

El éxito de éste método depende:

1. La correcta aplicación de la tensión de cortocircuito garantizando seguridad en cuanto a la temperatura de los devanados y el aislamiento.
2. La extracción del agua por termovacío al aceite que se está recirculando.

3. La correcta aplicación de vacío al transformador después de cada evacuación de la totalidad del aceite.
4. La capacidad de desplazamiento de la bomba de vacío en m³/h.

Cuidados y Desventajas:

1. No siempre es fácil conseguir la alimentación apropiada (Alimentación eléctrica).
2. Cuidado muy especial en el manejo de temperaturas vigilando no deteriorar los aislamientos.
3. Cuando el volumen de aceite es muy grande, proveer tanques de capacidad suficiente para recibir el aceite en cada una de las evacuaciones.

Este método de secado no es muy utilizado en la serie de transformadores tratada en este trabajo (34.5 kV en adelante) debido a que la alimentación eléctrica requerida para su secado es muy elevada, aunque se sugiere para transformadores de EHV por que su secado sería muy rápido. En fabrica se suele utilizar este método para secar transformadores en reparación este método de secado suele ser muy utilizado para el secado de pequeños transformadores en campo.

4.3 METODO DE ASPERSION DE ACEITE CALIENTE (HOT SPRAY) ⁽¹¹⁾

Para aplicar éste proceso se utilizan toberas de aspersión adecuadamente instaladas dentro del transformador de tal manera que el baño cubra todas las bobinas, aplicando al mismo tiempo vacío al transformador.

⁽¹¹⁾ Método de secado tomado de, GALLO, Ernesto DIAGNOSTICO Y MANTENIMIENTO DE TRANSFORMADORES EN CAMPO y TMI TRANSFORMER MAINTENANCE INSTITUTE: DRYING TRANSFORMERS

Es necesario disponer de una buena bomba de succión para vencer el vacío dentro del transformador, o si es necesario una bomba adicional auxiliar. El aceite que circula dentro del transformador en este proceso debe cumplir básicamente tres finalidades:

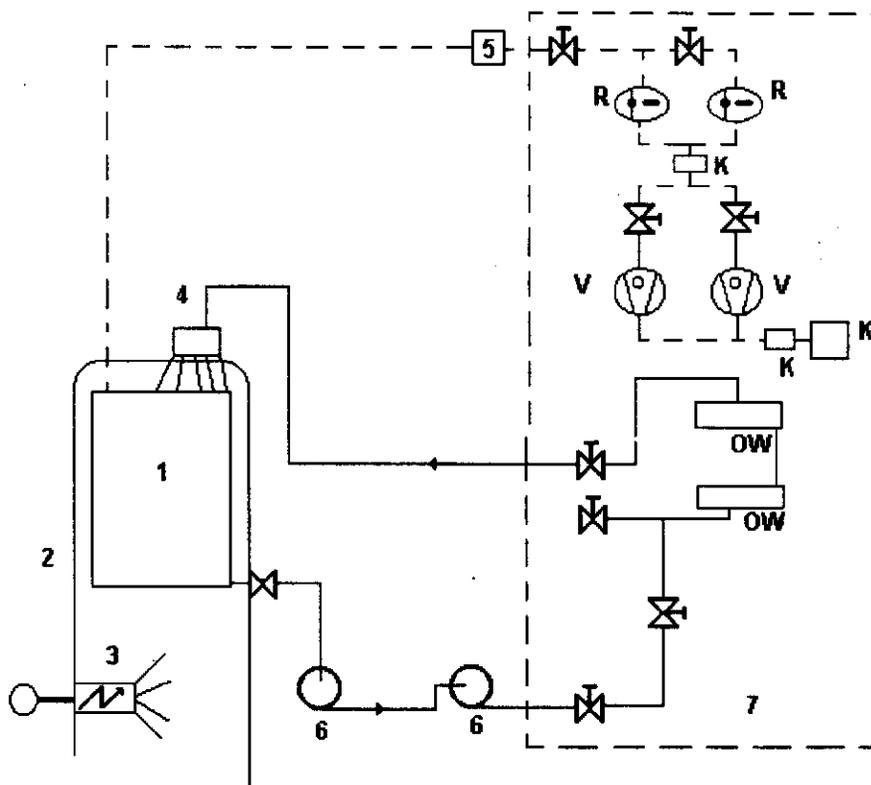
1. Ser agente de transferencia de calor hacia el interior del transformador.
2. Retirar por arrastre la humedad, la cual va ser eliminada en la cámara de vacío.
3. Efectuar un buen lavado al transformador para limpiar impurezas y lodos.

Normalmente se utiliza un 20 % del volumen de aceite del transformador, para lograr un calentamiento de la parte activa a una temperatura de 75 °C. Es conveniente utilizar mantas aislantes para mejorar la eficiencia del proceso.

Donde:

1. Transformador
2. Recubrimiento aislante
3. Ventilador y calentador
4. Distribuidor de aceite
5. Condensador de vapor de aceite
- 6/7. Bombas para presuramiento de aceite
- K. Condensadores
- R. Bombas Roots 800 m³ x hora
- V. Bombas de vacío 400 m³ x hora
- OW. Calentador de aceite.

FIGURA 11.



INSTRUMENTACION PARA UN SISTEMA DE SECADO POR HOT SPRAY

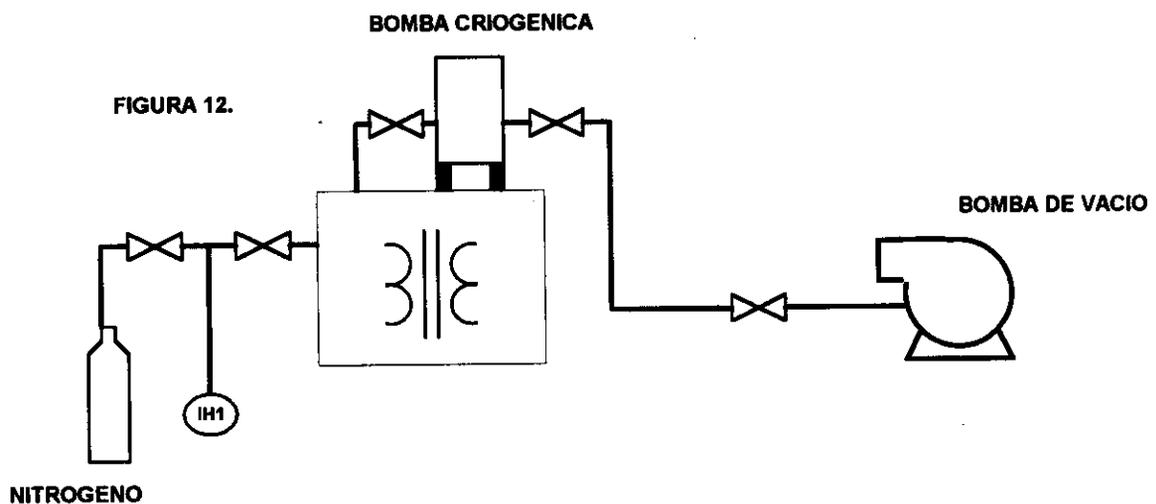
Ventajas y desventajas de este método de secado:

1. Tiempo reducido de secado.
2. Proceso continuo.
3. Lavado de la parte activa del transformador.
4. La instalación del sistema de toberas dentro del transformador presenta dificultades.
5. El aceite utilizado para el lavado y secado queda inservible pues los componentes aromáticos que son los inhibidores naturales contra la oxidación que posee con seguridad se han evaporado.

4.5 METODO CRIOGENICO.

(11) Se basa en el principio de enfriamiento por desecación. Se efectúa por medio de una bomba criogénica. Es un dispositivo altamente refrigerante que se coloca en la línea de vacío y estimula la condensación del vapor que se está extrayendo del transformador.

Se obtiene la gran ventaja de que se aumenta sensiblemente el diferencial de presiones de vapor de agua de la superficie de los aislamientos sólidos y la cámara fría de la bomba criogénica. Dicho diferencial puede alcanzar niveles entre 10 :1 y 100 :1, aumentando la eficiencia del secado y produciendo una migración rápida de las moléculas de agua del transformador hacia la bomba criogénica donde se condensan.



INSTRUMENTACION PARA UN SECADO MEDIANTE EL METODO CRIOGENICO

NOTA: SIMBOLOGIA UTILIZADA DE ACUERDO CON LA NORMA ISA 5.5

Este método de secado presenta las siguientes ventajas:

(11) Método tomado de: DIAGNOSTICO Y MANTENIMIENTO DE TRANSFORMADORES.

1. A temperatura ambiente por encima de 10 °C, no se requiere calentamiento de la parte activa.
2. La instalación es simple.
3. El proceso es rápido y posee un parámetro de control que es la cantidad de agua extraída mediante la medición del agua condensada en la cámara de la bomba criogénica con la ayuda de un erlenmeyer aforado.

Este método de secado presenta la desventaja que para temperatura ambiente por debajo de 10 °C se requiere un calentamiento adicional para mejorar la eficiencia, pues a baja temperatura el vacío necesario para alcanzar el rompimiento del equilibrio de las presiones de vapor de agua es muy bajo.

4.5 DETERMINACION DEL PUNTO FINAL DE SECADO:

Durante el proceso de secado en transformadores de potencia, es muy importante definir el punto final; es decir, el momento en el cual se pueda decir "el transformador está seco", y poder suspender el secado para trabajos finales de terminado.

Para poder definir el punto de secado existen varios métodos que son:

1. Medida del punto de Rocío (Dew Point).
2. Medida del agua extraída por condensación.
3. Índice de polarización.

4. Medida de la variación de la resistencia de los devanados.
5. Medición del factor de potencia de los aislamientos.
6. Medición del voltaje de paso.

4.5.1 Medida del Punto de Rocío: Control utilizado generalmente en campo, antes de iniciar el mantenimiento, con el fin de obtener la correspondiente presión de saturación del vapor de agua en el ambiente que rodea la celulosa dentro del transformador.

La temperatura del punto de rocío es aquella a la cual el vapor de agua se condensa cuando se enfría a presión constante.

Dicha medición debe hacerse después de 12 a 24 horas de haber dejado el transformador en atmósfera interna de nitrógeno para lograr la condición de equilibrio. Bajo esta condición no existirá diferencial de presiones parciales de vapor de agua en el ambiente que rodea la celulosa y en está. Por tanto con la presión parcial de vapor de agua y que corresponde a la temperatura del punto de rocío medida y que debe ser una presión de vacío y la temperatura que se mida en el devanado se pueda determinar, con la ayuda de gráficas disponer de presión contra temperatura el contenido de agua en porcentaje que hay en la celulosa.

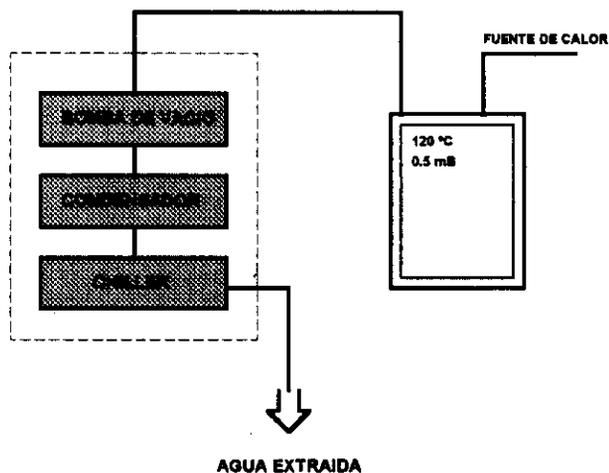
Este proceso entonces nos ubica en el estado inicial de humedad en que se encuentra el transformador y por tanto podemos estimar el tiempo que se requerirá para efectuar un secado adecuado dependiendo de las características que se tengan disponibles. El equipo utilizado para medir el punto de rocío es el higrómetro.

Se estima que un aislamiento con buen nivel de secado tiene alrededor de 0.5 % de contenido de humedad. Una vez determinada la temperatura del punto de rocío es posible encontrar la presión parcial de agua en el medio gaseoso nitrógeno, que en condiciones de equilibrio es la misma de la superficie del papel aislante, conocido como principio de equilibrio⁽¹²⁾

Mediante la grafica 13, se puede determinar el contenido de humedad en equilibrio para la madera y el papel Kraft constituyentes fundamentales de la parte activa de un transformador.

4.5.2 Medida del agua extraída por condensación: Método de control utilizado en fabrica que se utiliza generalmente en procesos de secado con aplicación de calentamiento y vacío.

FIGURA 14.



CONTROL DE SECADO MEDIANTE LECTURA DEL AGUA CONDENSADA.

(12) **Condición de equilibrio:** Cuando el contenido de agua de la celulosa y el medio que la rodea son estable, es decir que no hay transferencia de agua de un medio a otro. En condición de equilibrio la presión parcial de vapor de agua del medio que rodea la celulosa es igual a la presión de vapor de agua en la superficie de ésta.
Tomado de: TRANSFORMER MAINTENANCE INSTITUTE.

FIGURA 13.

CONTENIDO DE HUMEDAD EN EQUILIBRIO
PARA LA MADERA Y EL PAPEL KRAFT

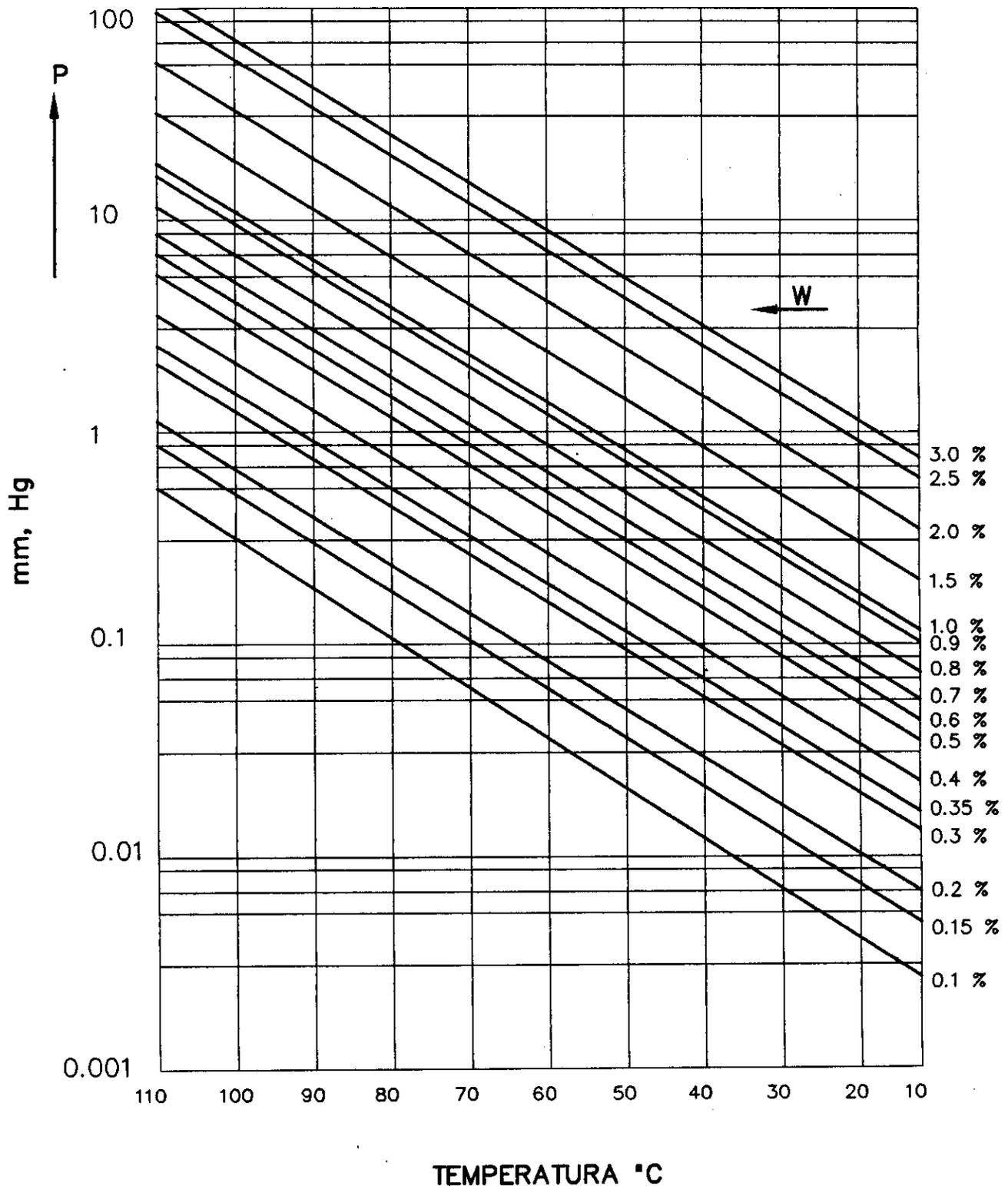


TABLA 7.

HUMEDAD PPM	PUNTO DE ROCIO °F	PUNTO DE ROCIO °C
970	-5	-20.6
740	-10	-23.3
560	-15	-26.1
422	-20	-28.9
317	-25	-31.7
235	-30	-34.4
174	-35	-37.2
128	-40	-40.0
92	-45	-42.8
67	-50	-45.6
48	-55	-48.3
34	-60	-51.1
23.6	-65	-53.9
16.6	-70	-56.7
11.4	-75	-59.4
7.8	-80	-62.2
5.3	-85	-65.0
3.53	-90	-67.8
2.35	-95	-70.6
1.53	-100	-73.3

RELACION DEL PUNTO DE ROCIO Y LA HUMEDAD EN PPM

Este control se basa en tener el transformador bajo condiciones de secado 120 °C y 0.5 mB, se lleva el agua a vapor satura al pasar por el condensador pasa a liquido saturado y por ultimo el chiller se encarga de extraer calor al agua para luego tomar muestra de humedad con un vicker o algún recipiente adecuado. Esta es una medida cuantitativa de la humedad extraída por que se toma el agua como tal. Es un control poco técnico y de baja confiabilidad ya que se depende demasiado de las características técnicas de los equipos.

4.5.3 Indice de Polarización: Control ya citado en este trabajo en el capitulo de pruebas de campo a los aislamientos del transformador en los transformadores.

4.5.4 Medida de la variación de la resistencia de los aislamientos: Este control de secado nos da una medida cualitativa de la calidad de nuestros aislamientos y se hace básicamente igual a prueba de megger normal. Se espera que la resistencia de los aislamientos aumente progresivamente durante el secado, hasta llegar a un valor elevado donde no se encontrará mayor variación, como lo indica la figura 15.



CONTROL DE SECADO MEDIANTE MEDIDA DE LA RESISTENCIA.

4.5.5 Medición del factor de potencia de los aislamientos: Control de secado muy eficiente que se tratará ampliamente en el próximo capítulo del presente trabajo por ser el fundamento de este.

4.5.6 Medición del voltaje de paso: Esta prueba es muy usual para determinar la presencia excesiva de humedad en el aislamiento del transformador y consiste en medir la resistencia del aislamiento a dos voltajes, primero el más bajo y luego otro preferiblemente cinco veces mayor (Por ejemplo 500 y 2500 V). Si la resistencia del aislamiento a la tensión más alta decrece en un 25 % o más se debe a la presencia de excesiva humedad, sin embargo si no hay presencia de humedad las dos medidas deben ser aproximadamente iguales, este método es usualmente llamado efecto Evershed. En la tabla 8 se muestra un ejemplo de utilización de este método para la determinación de la humedad.

TABLA 8.⁽¹³⁾

TIEMPO (MINUTOS)	2500 V PRI-GND MΩ	2500 V PRI-SEC MΩ	500 V SEC-GND MΩ
1/4	1138	1090	693
1/3	1217	1385	732
1/2	1297	1585	772
1	1305	1683	792
2	1365	1782	840
3	1365	1830	890
4	1385	1830	890
5	1385	1830	930
6	1385	1830	930
7	1385	1880	940
8	1385	1880	980
9	1385	1880	970
10	1385	1930	970

PRI-GND (500 V) : 1782 MΩ al minuto.

La resistencia a la tensión más alta decreció en un 73.2% lo que indica un contenido excesivo de humedad.

(13) Tomado de TMI TRANSFORMER MAINTENANCE INSTITUTE, Part 3 Electrical Insulation Test y Corrective Maintenance Procedures for Oil-Insulated Transformers.

FIGURA 17.

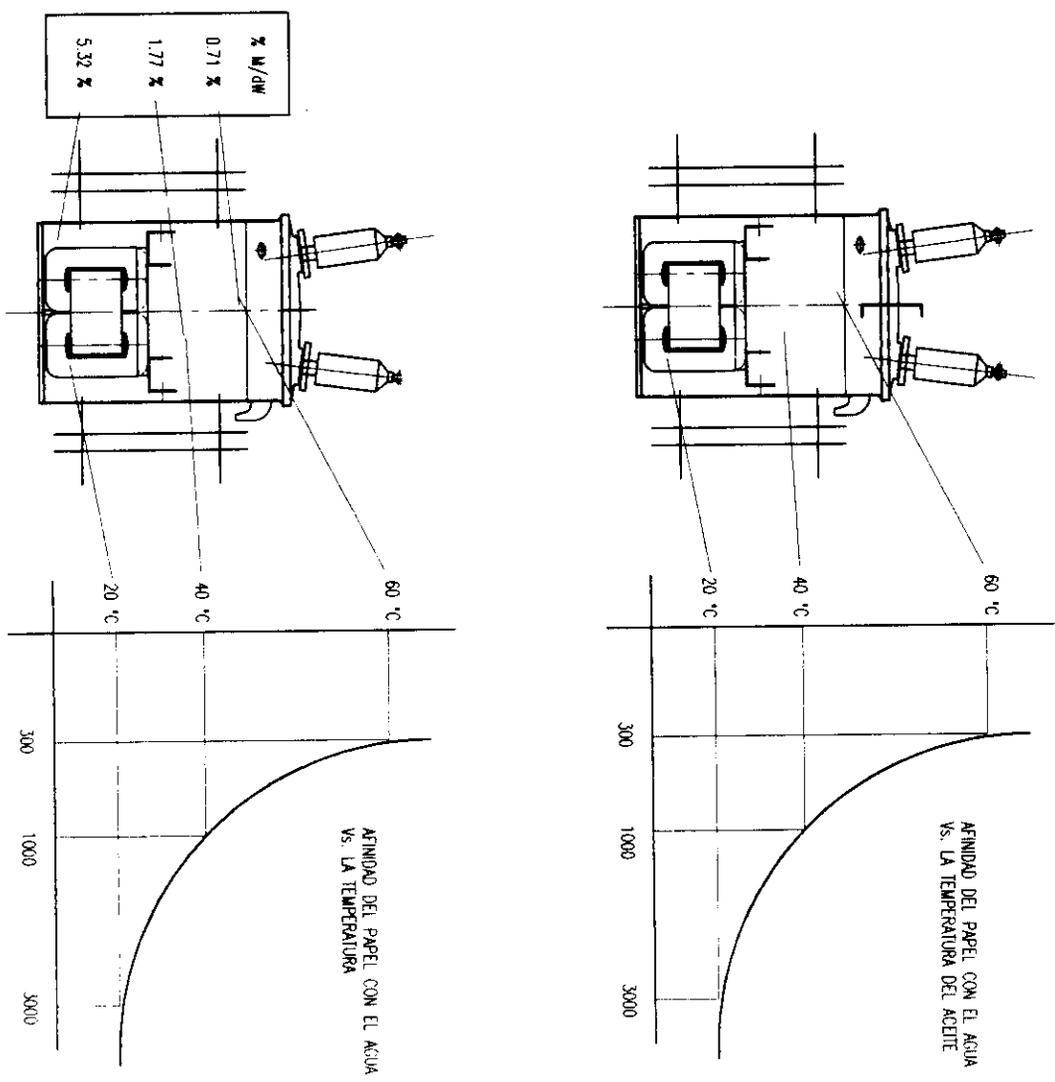
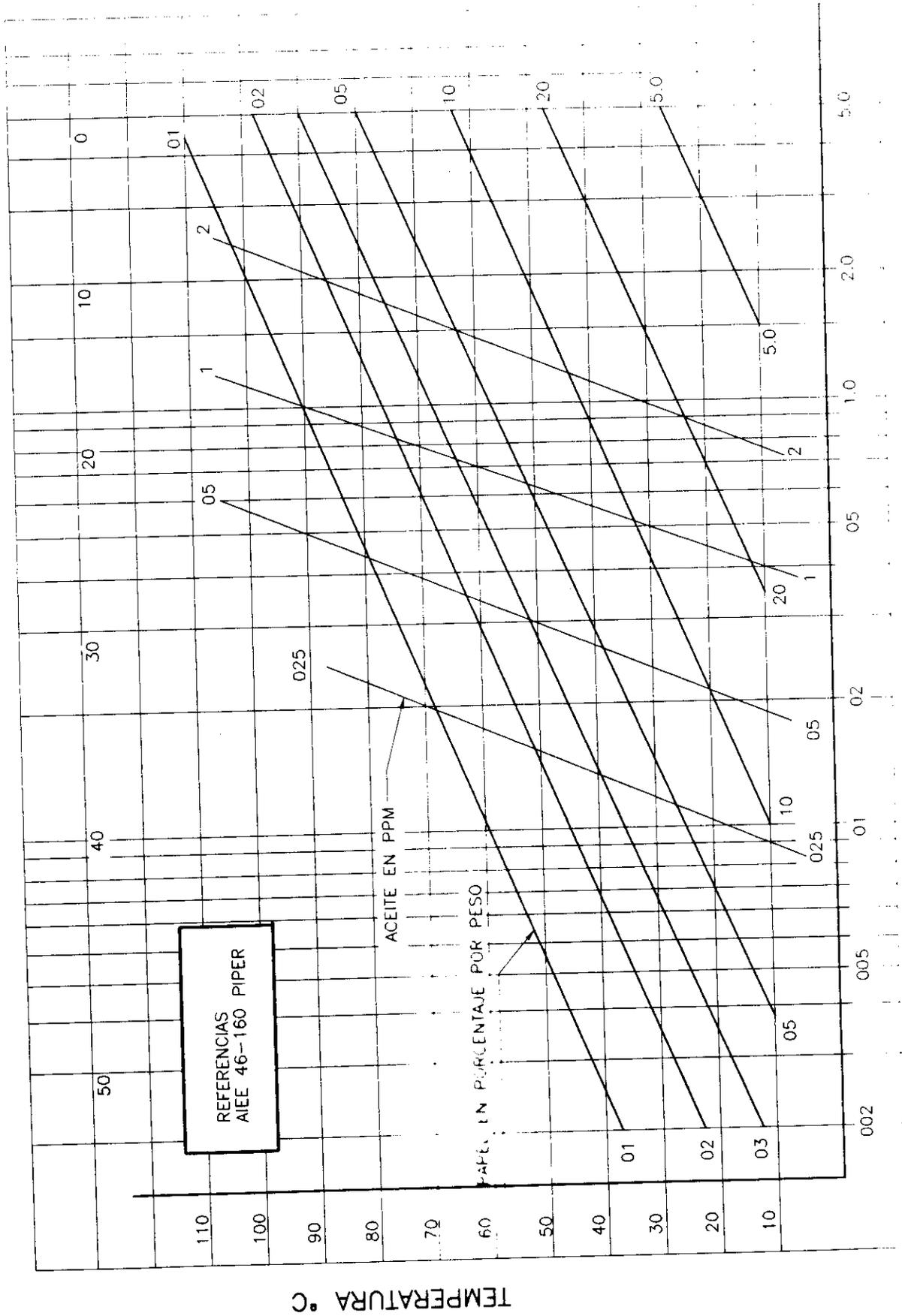


FIGURA 18.

CARTA DE PIPER

PRESION DE VAPOR TEORICA EN EQUILIBRIO PARA LA CELULOSA, ACEITE Y AIRE



PRESION DE VAPOR EN mmHg

4.5.7 MEDICION DEL CONTENIDO DE HUMEDAD MEDIANTE LOS MULTIPLICADORES DE MYERS:

Método desarrollado por la compañía S.D. MYERS de U.S.A, que utiliza como el base el principio del equilibrio. Es importante saber que el contenido de humedad del papel aumenta con la disminución de la temperatura, por lo cual se puede deducir un perfil de distribución de la humedad en el transformador, concluyendo que en la parte más baja habrá un mayor contenido de humedad ya que la temperatura es menor, como podemos ver este perfil es inverso al perfil térmico del transformador.

La compañía S.D. MYERS investigó a fondo este fenómeno y nos entregó como resultado de la investigación, la curva de la figura 16 de donde se obtienen los multiplicadores de MYERS en función de la temperatura de los devanados.

Tomando de la curva, para cada temperatura el multiplicador y aplicándolo directamente al valor en PPM de agua en el aceite (El cual se determina mediante el método de Karl Fisher, o se asocia con el punto de rocío, ver tabla 6), obtenemos el perfil de agua en porcentaje en el papel tal como se observa en la figura 17. Esta gráfica nos reafirma que el mayor contenido de humedad está en la parte inferior del transformador, debido a que allí se presenta la menor temperatura.

Asociando este método con la medición del punto de rocío se determina en forma cuantitativa el contenido de humedad presente en el aislamiento. Es importante también utilizar la grafica de Piper figura 18, la cual relaciona el contenido de humedad en porcentaje de peso del aislamiento con la presión parcial de vapor y la temperatura .

4.6 VIDA UTIL DEL TRANSFORMADOR ASOCIADA CON LA TEMPERATURA DE LOS DEVANADOS:

Es bien sabido que la vida útil de los aislamientos tiene gran dependencia con la temperatura a la cual han de ser sometidos, es claro que incrementos de la temperatura debido generalmente a sobrecargas o deterioro del aislamiento provocan disminución de la vida del transformador, en la tabla 9 se muestra el tiempo estimado de vida para transformadores con diferentes temperaturas de operación.

TABLA 9.

TEMPERATURA DE OPERACION °C	VIDA DEL ACEITE DEL TRANSFORMADOR
60	20 años
70	10 años
80	6 años
90	2 1/2 años
100	1 1/4 años
110	7 meses

TIEMPO ESTIMADO PARA EL ACEITE DE TRANSFORMADORES CON NUMERO DE NEUTRALIZACION 0.25 mg KOH/g ⁽¹⁴⁾

La vida esperada de un transformador, con diversas temperaturas de operación, no puede conocerse exactamente pero la grafica 19 de pérdida de vida se considera como la mejor información obtenida hasta la fecha en investigaciones de tipo industrial.

Esta grafica de pérdida de vida con la temperatura se asocia a la siguiente ecuación:

$$\text{Log}_{10} \text{ vida(h)} = A + \frac{B}{T}$$

(14) Tomado del MTI Charper 5. Transformer Loading Criteria

Donde;

T : Temperatura absoluta en grados kelvin

$$T = \theta_{hs} + 273$$

A y B : Constantes:

Que para Rise de 65° C

$$A = -11.269 \quad B = 6328.8$$

Para rise de 55 °C

$$A = -11.968 \quad B = 6328.8$$

Despejando de la ecuación 2 se obtiene:

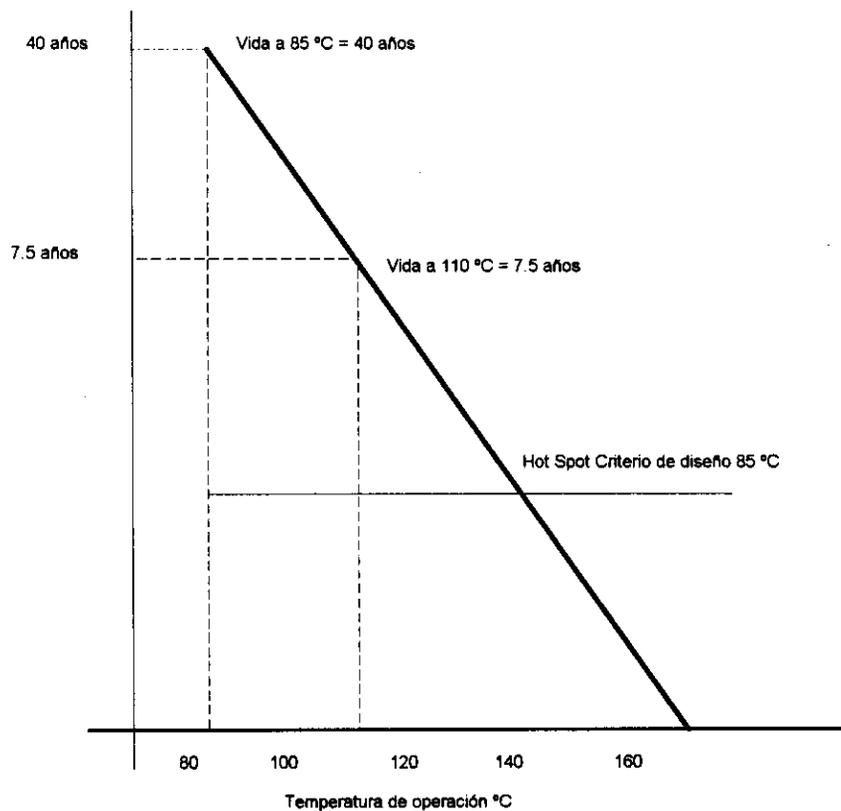
$$\% \text{ Pérdida de vida} = 100 \times t \times 10^{\left[\frac{-B}{T} - A \right]}$$

Donde t es el tiempo de sobrecarga, de las dos ecuaciones anteriores se observa que el factor de cálculo es la determinación del θ_{hs} (Temperatura en el punto más caliente), para mostrar como se determina este valor se realiza un ejemplo donde se calcula la pérdida de vida de un transformador de 2500 KVA y 34500 voltios por el lado de A.T, la metodología seguida para este cálculo esta según la ANSI C57.91-19881 y la NTC 2482.

EJEMPLO: DETERMINACION DEL LA PERDIDA DE VIDA PARA UN TRANSFORMADOR

Parámetros de entrada: Estos son obtenidos de la placa característica y la norma ANSI C.57.92-1981, por ser un transformador de potencia mayor a 800 KVA, para estas potencias o inferiores se consulta la norma NTC 2482.

FIGURA 19.



**VIDA DE LOS DEVANADOS DEL TRANSFORMADOR CONTRA LA TEMPERATURA
(Rise 65 °C)**

Potencia: $S = 2500 \text{ KVA}$

Pérdidas bajo carga : $P_{cu} = 22000 \text{ W}$

Pérdidas en vacío : $P_o = 3100 \text{ W}$

Gradiente máximo de temperatura en el aceite. $\theta_{or} = 55 \text{ °C}$

Rise : 65 °C

Precarga 90 % $K_i = 0.9$

Pico de sobrecarga 152 % $K_u = 1.52$

Máximas pérdidas de vida por día : ----- 0.0137 % (800 KVA o menos)
----- 0.0369 % (mayores a 800 KVA)

Los cálculos efectuados se realizan suponiendo ciclos de 24 horas y mínima duración de 20 años, según ANSI C57.92-1981

1. Elevación de temperatura inicial debida a una carga continua en el nivel superior del liquido refrigerante.

$$\theta_{oi} = \left[\frac{(K_i^2 R + 1)}{R + 1} \right]^{0.8} \theta_{or}$$

Donde :

R : Relación de pérdida = Pcu/Po

Remplazando en la ecuación obtenemos: 47.5 °C

2. Elevación final del punto caliente sobre el nivel superior del liquido refrigerante:

$$\theta_{gi} = K_i^{1.6} \cdot \theta_{gr}$$

$$\theta_{gr} = \theta_{wr} - \theta_{or} + 10$$

$$\theta_{wr} = Rise$$

Remplazando en las ecuaciones obtenemos :

$$\theta_{gr} = 20 \text{ °C}$$

$$\theta_{gi} = 25.3 \text{ °C}$$

3. Calentamiento final en el nivel superior del liquido refrigerante sobre el ambiente, si el pico aplicado se mantiene indefinidamente:

$$\theta_{ou} = \left[\frac{(Ku^2 R + 1)}{R + 1} \right]^{0.8} \theta_{or}$$

Remplazando en la ecuación obtenemos: $\theta_{ou} = 101.4 \text{ } ^\circ\text{C}$

4. Elevación final del punto más caliente sobre el nivel superior del líquido refrigerante:

$$\theta_{gu} = Ku^{1.6} \cdot \theta_{gr}$$

Remplazando en la ecuación obtenemos: $\theta_{gu} = 58.6 \text{ } ^\circ\text{C}$

5. Capacidad calorífica del transformador:

$$C = 0.132 \times (\text{Peso de la P.A}) + 0.088 \times (\text{Peso tanque}) + 0.352 \times (\text{Litros de aceite})$$

Donde :

Peso P.A : 2810 Kg

Peso tanque: 1300 Kg

Volumen de aceite: 1300 lts

Remplazando en la ecuación obtenemos : $C = 933.82$

6. Constante de tiempo del nivel superior del líquido refrigerante a KVA nominales:

$$\tau = \frac{C}{S}$$

Remplazando obtenemos: $\tau = 20.5$

7. Ecuación para el calentamiento del nivel superior del líquido refrigerante sobre el ambiente en un tiempo t:

Constante de tiempo en cualquier instante t:

$$\tau_o = \frac{c (\theta_{ou} - \theta_{oi})}{(K_u^2 - K_i^2) * P_{cu}}$$

Remplazando en la ecuación se obtuvo : $\tau_o = 1.524$

$$\theta_o = (\theta_{ou} - \theta_{oi}) (1 - e^{-\frac{t}{\tau_o}}) + \theta_{oi}$$

Para t = 2 horas obtenemos: $\theta_o = 89.6 \text{ }^\circ\text{C}$

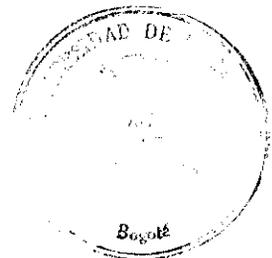
8. Temperatura pico superior del líquido refrigerante durante el ciclo de 24 horas:

$$\theta_{pk} = \theta_a + \theta_o$$

Donde θ_a (temperatura ambiente) = $20 \text{ }^\circ\text{C}$, obtenemos : $\theta_{pk} = 106.9 \text{ }^\circ\text{C}$

9. Calentamiento del punto mas caliente sobre la temperatura del nivel superior del líquido refrigerante en un tiempo t = 2 horas.

$$\theta_g = (\theta_{gu} - \theta_{gi}) (1 - e^{-\frac{t}{\tau_{hs}}}) + \theta_{gi}$$



Donde :

t_{hs} (Constante de tiempo del punto más caliente del conductor en horas) = 0.0834 °C

Remplazando obtenemos : $\theta_g = 58.6$ °C

10. Por ultimo se determina la temperatura del punto caliente para un periodo t de 2 horas:

$$\theta_{hs} = \theta_a + \theta_o + \theta_g$$

Remplazando obtenemos : $\theta_{hs} = 165.5$ °C

Comparando este resultado con la tabla 10, podemos tener una expectativa de vida para dicho transformador de aproximadamente 22 dias con una temperatura en forma costanate de 165.5 °C.

TABLA 10.

Temperatura del punto caliente θ_{hs} (°C)	Expectativa de vida útil	% de vida ganada o perdida
180	4 (Dias)	99.9
160	25(Dias)	99.1
140	250(Dias)	90.8
110	7.5(Años)	100
100	22(Años)	293
85	102(Años)	1360
75	152(Años)	2027

Observando esta tabla podemos observar que un transformador con un punto caliente (Hot spot) de 75 °C puede tener una vida útil de hasta 152 años.

4.7 BENEFICIOS DEL SECADO:

Los principales logros de un correcto secado son:

- * Mínimas descargas parciales (Disminución del efecto corona).
- * Se remueve el oxígeno indeseado.
- * Se remueven los gases combustibles.
- * Aceite con contenidos bajos de humedad.

5 CONTROL DE SECAMIENTO MEDIANTE LA MEDICION DEL FACTOR DE PERDIDAS DE LOS AISLAMIENTOS.

En esta parte final del presente trabajo se describe cómo se realiza la medición de la $\tan\delta$ a transformadores de potencia en fabrica y cómo se realizará dicha medición en un control de secamiento a transformadores de potencia.

Para entender de una forma clara los conceptos aquí citados se realiza inicialmente una introducción al tema con su correspondiente formulación.

5.1 GENERALIDADES Y FORMULACION.

5.1.1 Capacitancia (C): Es la propiedad de un condensador o un sistema de dos conductores separados por un medio aislante o dieléctrico, la cual permite almacenar cargas eléctricamente separadas, cuando una diferencia de potencial existe entre los dos conductores o entre dos electrodos. Luego la capacidad es:

$$C = \frac{q}{V} \quad (\text{ECUACION 4}).$$

donde:

C \Rightarrow Capacidad en faradios.

q \Rightarrow Carga en Culombios

V \Rightarrow Diferencia de potencial en voltios

5.1.2 Factor de Disipación (D) ($\tan\delta$): Es la relación entre la reactancia capacitiva y la resistencia,. (Aplicable en el modelo paralelo, para el modelo serie es diferente ver la formulación siguiente).

$$(ECUACION 5).$$

$$D = \frac{K''}{K'} \quad D = \tan\delta = \cot\theta = \frac{X_p}{R_p} = \frac{G}{\omega C_p} = \frac{1}{\omega C_p R_p}$$

Donde:

$G \Rightarrow$ Conductancia equivalente

$X_p \Rightarrow$ Reactancia en paralelo

$R_p \Rightarrow$ Resistencia equivalente en paralelo(Bajo una tensión alterna)

$C_p \Rightarrow$ Capacitancia paralelo

$\omega \Rightarrow$ Frecuencia angular ($2\pi f$)

La relación entre el equivalente serie y el paralelo:

(ECUACION 6).

$$C_p = \frac{C_s}{(1 + D^2)} \quad \frac{R_p}{R_s} = \frac{(1 + D^2)}{D^2} = 1 + \frac{1}{D^2} = 1 + Q^2$$

Donde:

$C_s \Rightarrow$ Capacitancia Serie

$R_s \Rightarrow$ Resistencia equivalente serie

$Q \Rightarrow$ Factor de calidad ($Q = 1/D$)

5.1.3 Angulo de Pérdidas (δ):

$$\delta = \arctan \left[\frac{K''}{K'} \right] \quad \text{ó} \quad \delta = 90 - \theta \quad (ECUACION 7).$$

5.1.4 $K''(\epsilon'')$: Se obtiene del producto entre la permitividad relativa y el factor de disipación.

$$K'' = K' D = (\epsilon^2 \times 2\pi f \times \epsilon_0)^{-1} \text{ (ECUACION 8).}$$

5.1.5 Angulo de Fase (θ):

$$\theta = \text{arccot}(K''/K') \text{ (ECUACION 9).}$$

5.1.6 Factor de Potencia PF ($\cos\theta$): Es la relación de la potencia disipada por el material en W, sobre el producto del voltaje sinusoidal V aplicado y la corriente I. Es expresado como el coseno del angulo de fase θ .

$$PF = \frac{W}{VI} = \frac{G}{\sqrt{G^2 + (\omega C_p)^2}} = \sin\delta = \cos\theta \text{ (ECUACION 10).}$$

Cuando el factor de disipación es menor a 0.1 el factor de potencia difiere del factor de disipación en menos del 0.5 %. La relación exacta es la siguiente:

$$PF = \frac{D}{\sqrt{1+D^2}} \quad D = \frac{PF}{\sqrt{1-PF^2}} \text{ (ECUACION 11).}$$

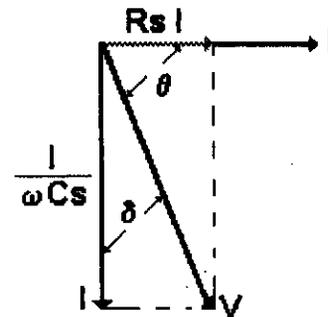
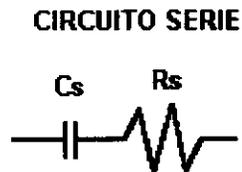
El factor de disipación depende basicamente del tipo de material aislante y de las condiciones del mismo.

5.1.7 Permitividad Relativa K' (ϵ'): Es la relación de la capacidad equivalente paralela C_p , con la capacidad del material C_v .

$$K' = C_p/C_v \text{ (ECUACION 12).}$$

DIAGRAMA VECTORIAL EQUIVALENTE

FIGURA 20.



CIRCUITO PARALELO

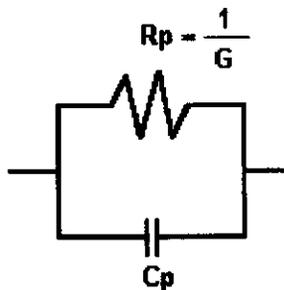
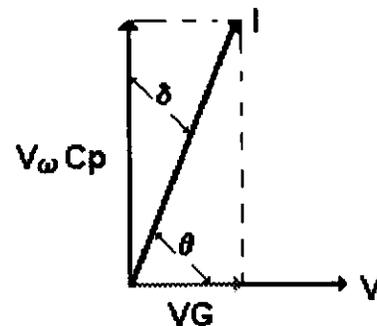


DIAGRAMA VECTORIAL EQUIVALENTE



5.2 MEDICION DE CAPACITANCIAS Y $\tan \delta$.

Ensayo especial realizado en fabrica por solicitud del cliente que tiene por objeto medir la capacitancias internas del transformador y el estado final de los aislamientos en lo relacionado con la humedad y los contaminantes presentes.

Es usual realizar las siguientes medidas:

UST : (Ungrounden Specimen Test) (Objeto de prueba sin aterrizar) = CHL

GST : (Grounded Specimen Test) (Objeto de prueba aterrizado) = CHL + CH

GSTg : (Grounded Specimen Test with Guard) (Objeto de prueba aterrizado con guarda) = CH

En la figura 21 y 22 se muestran dichas capacitancias:

FIGURA 21

TRANSFORMADOR CON DOS DEVANADOS

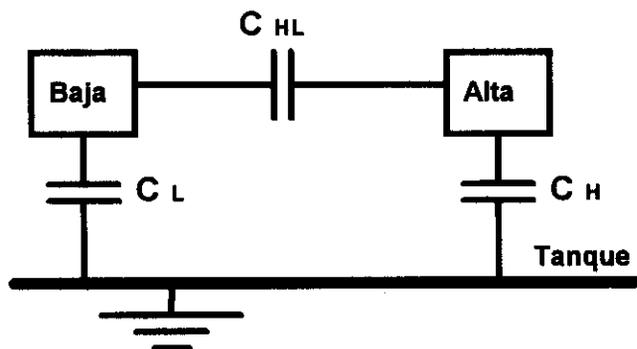
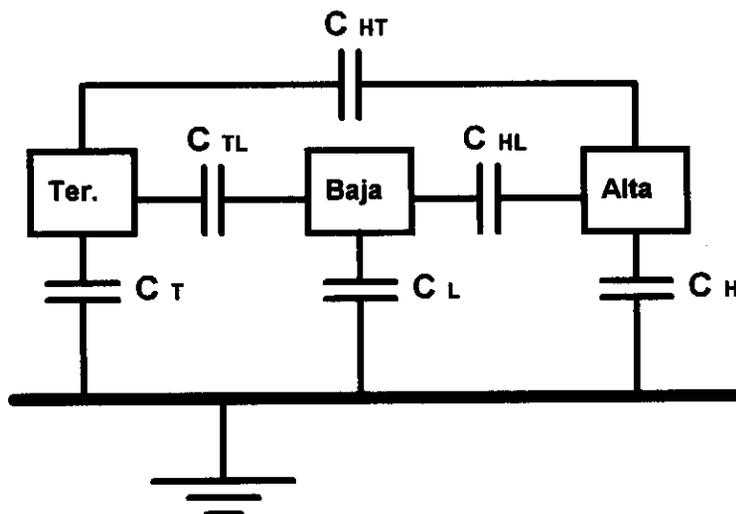


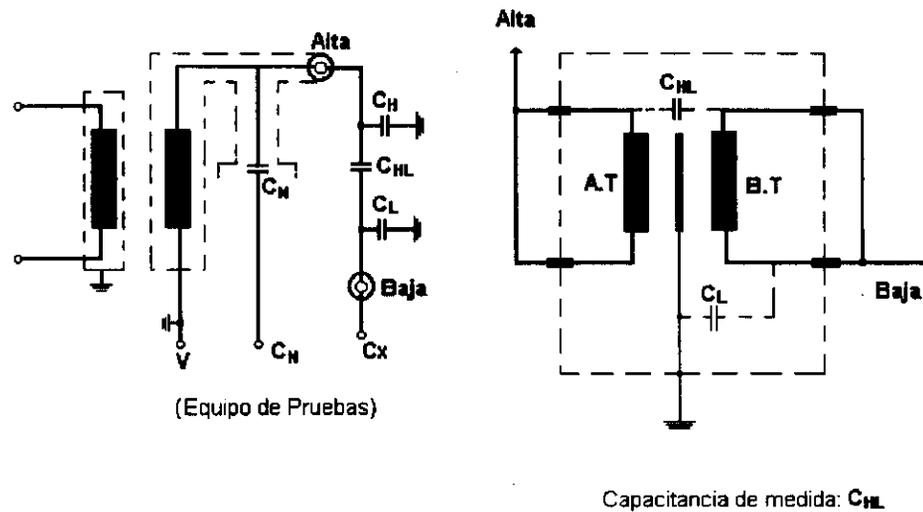
FIGURA 22.

TRANSFORMADOR CON TRES DEVANADOS



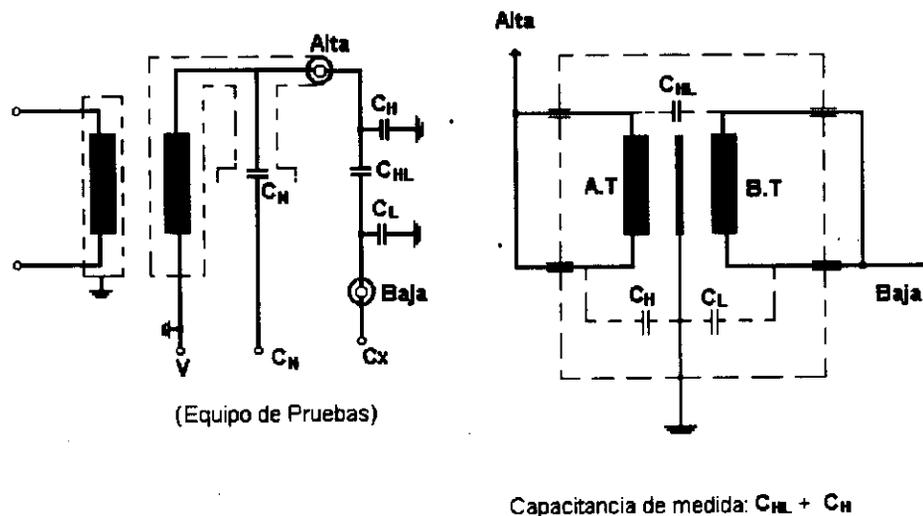
5.2.1 El Circuito UST : Esta prueba mide la capacitancia y el factor de disipación entre el devanado de alta tensión y el devanado de baja tensión. El tanque del transformador debe estar aterrizado.

UST: OBJETO DE PRUEBA SIN ATERRIZAR



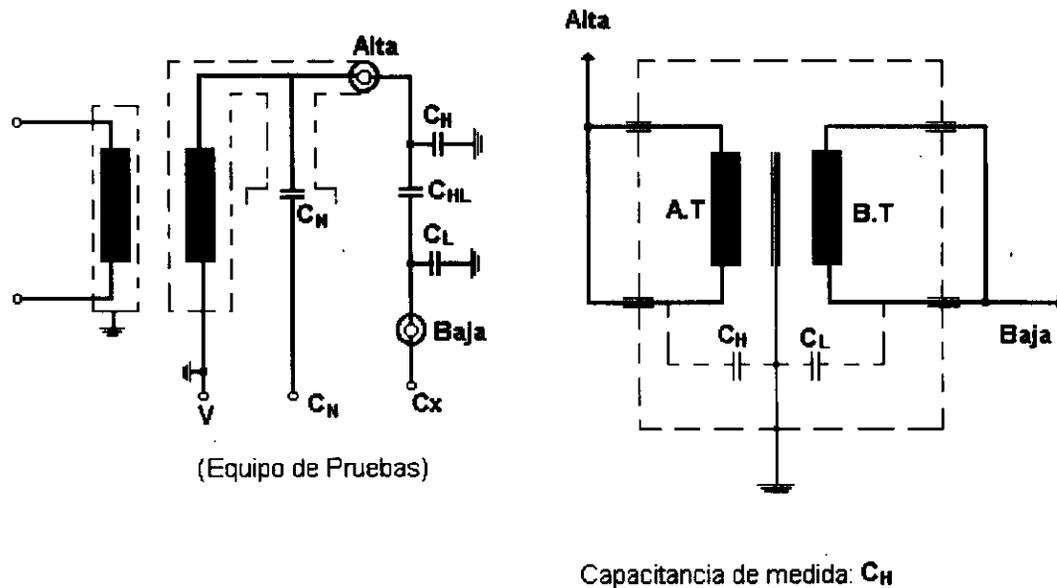
6.2.2 El circuito GST: Esta prueba mide la capacitancia y el factor de disipación (factor de pérdidas), entre el devanado de alta tensión y el devanado de baja tensión, junto con la capacitancia en paralelo entre el devanado de alta tensión y el tanque. El devanado de baja tensión es conectado al tanque.

GST: OBJETO DE PRUEBA ATERRIZADO



6.2.3 El circuito GSTg: Esta prueba mide la capacidad y el factor de disipación (factor de pérdidas), entre el devanado de baja tensión y el tanque.

GSTg: OBJETO DE PRUEBA ATERRIZADO CON GUARDA



5.2.4 Datos Obtenidos: El valor esperado de la $\tan\delta$ es un resultado difícilmente predecible ya que su valor depende bastante del estado de los aislamientos y esto es a su vez función del medio ambiente al que son sometidos. En este trabajo se muestran los valores obtenidos con diferentes transformadores de potencia (Ver capítulo 6).

5.3 CONTROL DE SECAMIENTO MEDIANTE LA MEDIDA DE LA $\tan\delta$:

Como sea expuesto a lo largo del presente trabajo la medida de la $\tan\delta$ o factor de disipación que produce una serie de pérdidas que se transforman en calor y que se conocen como factor de pérdidas de los aislamientos, se pueden usar como control de secamiento.

Este control de secamiento debe incorporarse en la fabricación de transformadores de potencia por exigencia de la norma TUF 1113. En esta parte final del presente trabajo se explica como se realizaría dicho control en fabrica, que resultados se esperan, precauciones a tener en cuenta y equipo que se debe utilizar.

5.3.1 Aspectos a tener en cuenta: Es muy importante conocer el método de secado que se utilice en la fabrica, identificando las diversas etapas del proceso.

5.3.1.1 Métodos de secado con solo calentamiento: Aquellas técnicas de secado en las que únicamente se aplica calentamiento a presión atmosférica no se tienen mayores restricciones operativas para implementar la medida de la tanδ.

6.3.1.2 Métodos con aplicación de vacío: En todas las técnicas de secado eficientes suele utilizarse el vacío, en estos casos hay que tener en cuenta las siguiente precaución:
Nunca aplicar tensión a un transformador sometido a presión de vacío, porque se presentara un cortocircuito, debido a que la resistencia observada por el equipo de prueba será muy baja.

Para solucionar el inconveniente del eventual circuito en métodos de secado que incluyan aplicación de vacío, se debe romper el vacío con nitrógeno o aire seco que no incorpora humedad al transformador y será facilmente evacuado en el proceso de secado por el calentamiento.

5.3.2 Instalación adecuada para la medida de la tanδ en el proceso de secado: La instalación requerida para la medición de la tanδ en proceso de secado debe ser un

montaje instrumental en donde se tenga claro el concepto de no poder aplicar tensión al transformador mientras este presente el vacío, lo que implica romper el vacío mediante nitrógeno o aire seco.

5.3.3 Resultados Esperados: El factor de disipación es un valor difícil de predecir en un transformador debido a su gran dependencia de:

1. Tipo de papel utilizado, debido a que cada fabricante de papel tiene sus propias condiciones técnicas de suministro (Los datos que se indican en este trabajo corresponde al papel marca WEIDMANN).
2. El medio ambiente al que suele ser sometida la parte activa del transformador antes de ser encubada (humedad relativa del medio).
3. La correcta aplicación del método de secado. Se ha comprobado en fabrica que una falla en la bomba de vacío durante la aplicación de la presión de vacío aumentara ampliamente el contenido de humedad que afectara la lectura de la $\tan\delta$.
4. Es aconsejable realizar la medida de la $\tan\delta$ siempre con la misma tensión de prueba, generalmente suele realizarse a 10 kV, pero este valor puede variar de acuerdo con el voltaje de tensión aplicada. Si la mitad del voltaje de tensión aplicada es menor a 10 KV ese será el voltaje de prueba.

Ejemplos:

- a. *Transformador de tensión de 34.5 kV en A:T* : Tensión aplicada de 70 KV, la mitad de dicha tensión es de 35 KV por lo cual el ensayo de $\tan\delta$ se realiza con 10 KV.

b. *Transformador de 4.16 KV en AT*: Tensión aplicada de 19 KV, la mitad de dicha tensión es de 9.5 KV por lo cual el ensayo de $\tan\delta$ se realiza con 8 o 9 KV.

Teniendo claro estos aspectos se describe a continuación una gráfica de tendencia esperada, para un control de secamiento mediante la media de la $\tan\delta$. De esas gráficas y de datos tomados en gráfica se pueden esperar los siguientes resultados:

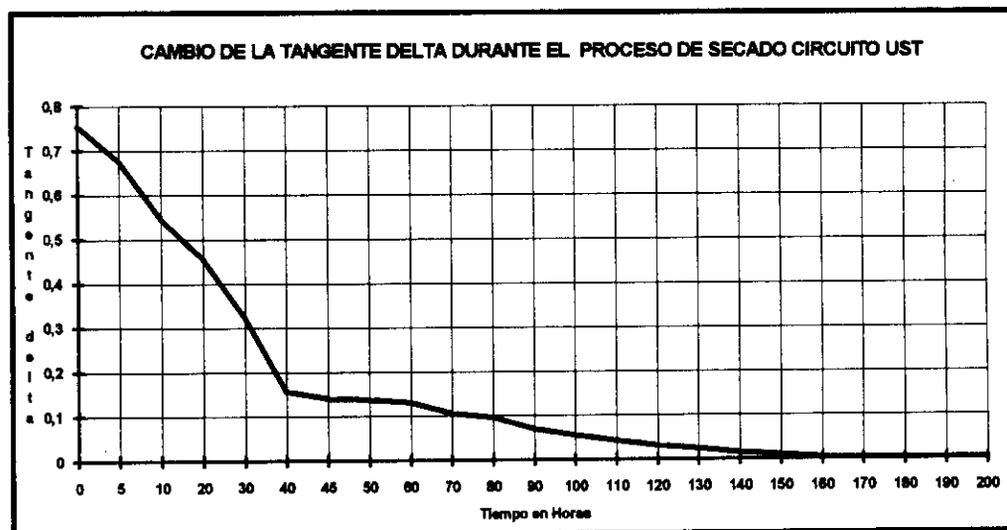
Circuito UST \Rightarrow 0.001 - 0.05

Circuito GST \Rightarrow 0.002 - 0.05

Circuito USTg \Rightarrow 0.002 - 0.05

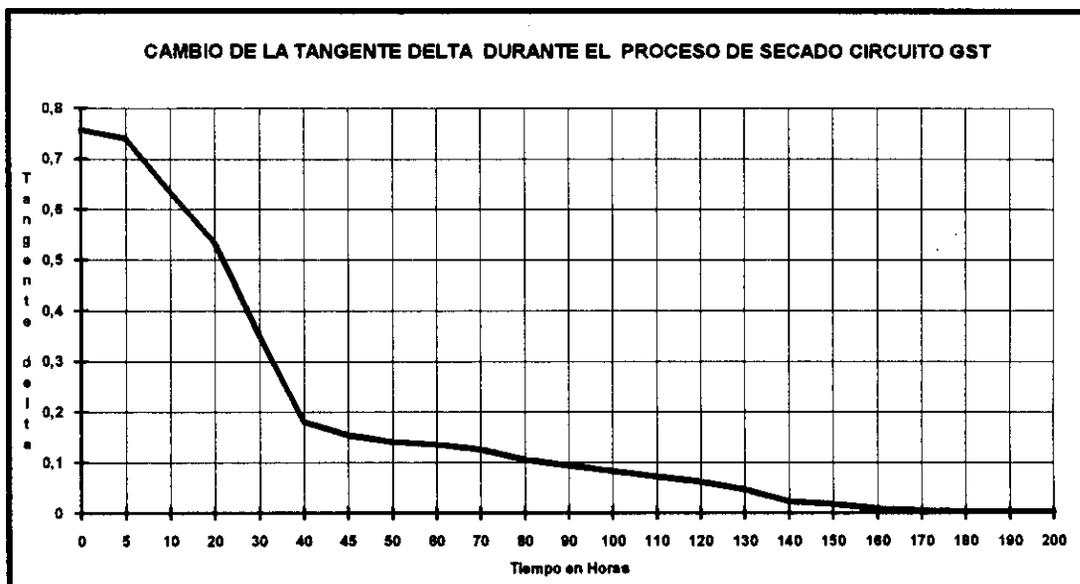
Estos valores son validos únicamente para transformadores nuevos, no expuestos aún al medio de trabajo.

GRAFICA 26.



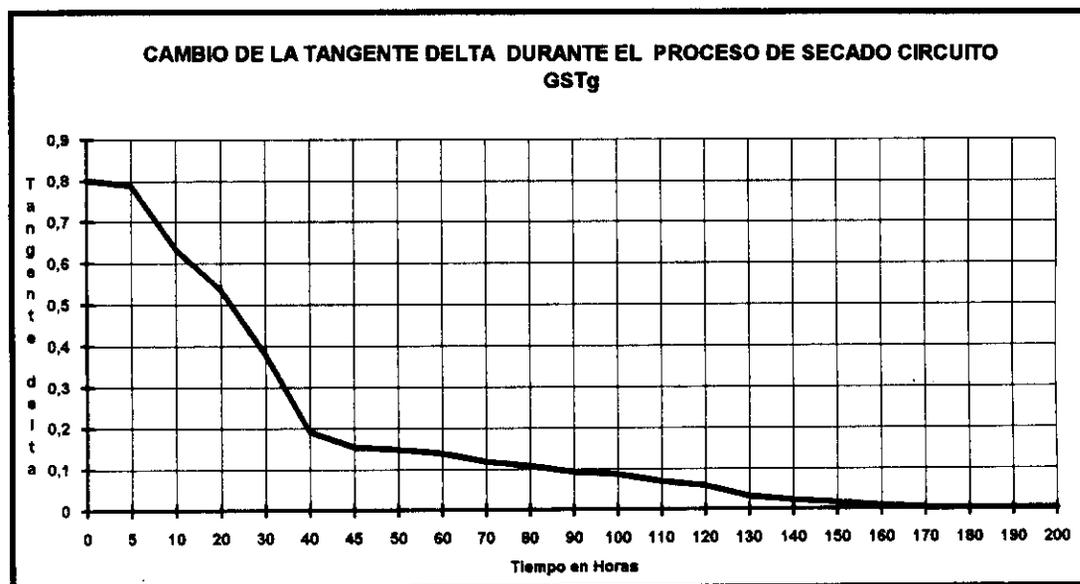
GRAFICA DE TENDENCIA PARA LA $\tan\delta$ EN UN PROCESO DE SECADO CIRCUITO UST

GRAFICA 27.



GRAFICA DE TENDENCIA PARA LA $\tan\delta$ EN UN PROCESO DE SECADO CIRCUITO GST

GRAFICA 28.



GRAFICA DE TENDENCIA PARA LA $\tan\delta$ EN UN PROCESO DE SECADO CIRCUITO GSTg

Como complemento a estos datos se muestra una serie de datos esperados de factor de potencia para diferentes materiales y para diferentes equipos ensamblados.

(13) TABLA 11.

MATERIAL	% P.F a 20 °C
AIRE	0.00
ACEITE	0.05
PAPEL	< 0.5
VARNICES	4 - 8
AGUA	100

FACTOR DE POTENCIA PARA DIVERSOS MATERIALES

TABLA 12.

EQUIPO	% P.F a 20 °C
PASATAPAS TIPO CONDENSADOR LLENOS EN ACEITE	0.2 - 0.5
TRANSFORMADORES DE POTENCIA LLENOS EN ACEITE	0.3 - 0.6
TRANSFORMADORES DE DISTRIBUCION LLENOS EN ACEITE	0.4 - 1.0
CABLES AISLADOS EN PAPEL	0.3 - 0.5
CABLES AISLADOS EN POLIETILENO	0.1 - 0.3

FACTOR DE POTENCIA PARA EQUIPOS ACOPLADOS

(13) Valores de factor de potencia en porcentaje obtenido para equipos ensamblados.

6. ENSAYOS Y CONCLUSIONES.

Esta parte final del presente trabajo tiene por objeto describir una serie de ensayos realizados durante el año de trabajo que ha implicado este documento. Aquí se describen ensayos realizados al papel presspan, a la madera KP, secados a transformadores en horno, ensayos de tanδ al papel, ensayos de tanδ a transformadores terminados y se generan las conclusiones pertinentes a cada caso.

6.1 ENSAYO DE SECADO AL PRESSPAN DE 2 mm (T = 100 °C).

6.1.1 Objetivo del Ensayo: Determinar humedad que se le puede extraer al presspan, durante un proceso de secado con condiciones especiales de presión y temperatura.

6.1.2 Condiciones del Ensayo: Para realizar dicho secado se necesita tener constante los siguientes parámetros:

Temperatura : 100 °C

Presión: 11,7 psi (Presión en Bogotá)

6.1.3 Uso del Presspan: El presspan es un compuesto higroscópico, obtenido de la celulosa que debe cumplir con las condiciones indicadas en la norma *DIN 7733* .

El presspan se usa en transformadores de potencia para elaborar:

1. Tabiques.
2. Cilindros.
3. Distanciadores.
4. Tacos.
5. Listones.
6. Portaconductores.

6.1.4 Norma Seguida: Estos ensayos fueron realizados siguiendo la norma NTC 334.

6.1.5 Equipos y Materiales Utilizados: Para realizar estos ensayos se utilizaron los siguientes elementos:

1. Muestras de papel presspan de 2 mm (15).
2. Balanza Analítica : MAGEMA VEB Großwagen Berlín.
3. Homo de secado : memmert. P1210
4. Pinzas de laboratorio
5. Termómetro: FLUKE
6. Termocupla tipo K.
7. Desecador

6.1.6 Procedimiento del Ensayo:

Se tomaron 15 muestras de papel presspan de 2 mm marca WEIDMANN, que cumple con las condiciones técnicas impuestas en la norma DIN 7733 posteriormente se pesaron e introdujeron al horno con las condiciones previamente descritas. Durante 72 horas se sometieron a calentamiento dichas muestras, midiendo periódicamente el peso y calculando el cambio de peso.

6.1.7 Valores Obtenidos:

Una vez finalizado el ensayo se procedió a calcular el cambio de peso en porcentaje haciendo uso de la siguiente ecuación:

$$\Delta\omega = \left[1 - \frac{W_h}{W_i} \right] \times 100 \quad \text{ECUACION 13.}$$

Donde:

$\Delta\omega$ Cambio de peso en porcentaje.

W_i Peso Inicial.

W_h Peso Medido

Remplazando en esta ecuación se obtuvieron los siguientes valores:

TABLA 13.

HORAS DE SECADO	Δw (%)
3	4,6725
5	5,5257
7	6,3020
9	6,4259
14	6,6838
20	6,9711
23	7,8509
26	7,9379
29	8,1087
48	8,2123
72	8,2121

Posteriormente se procede a graficar dichos datos, para mostrar la tendencia del proceso de secado.

6.1.8 Conclusiones:

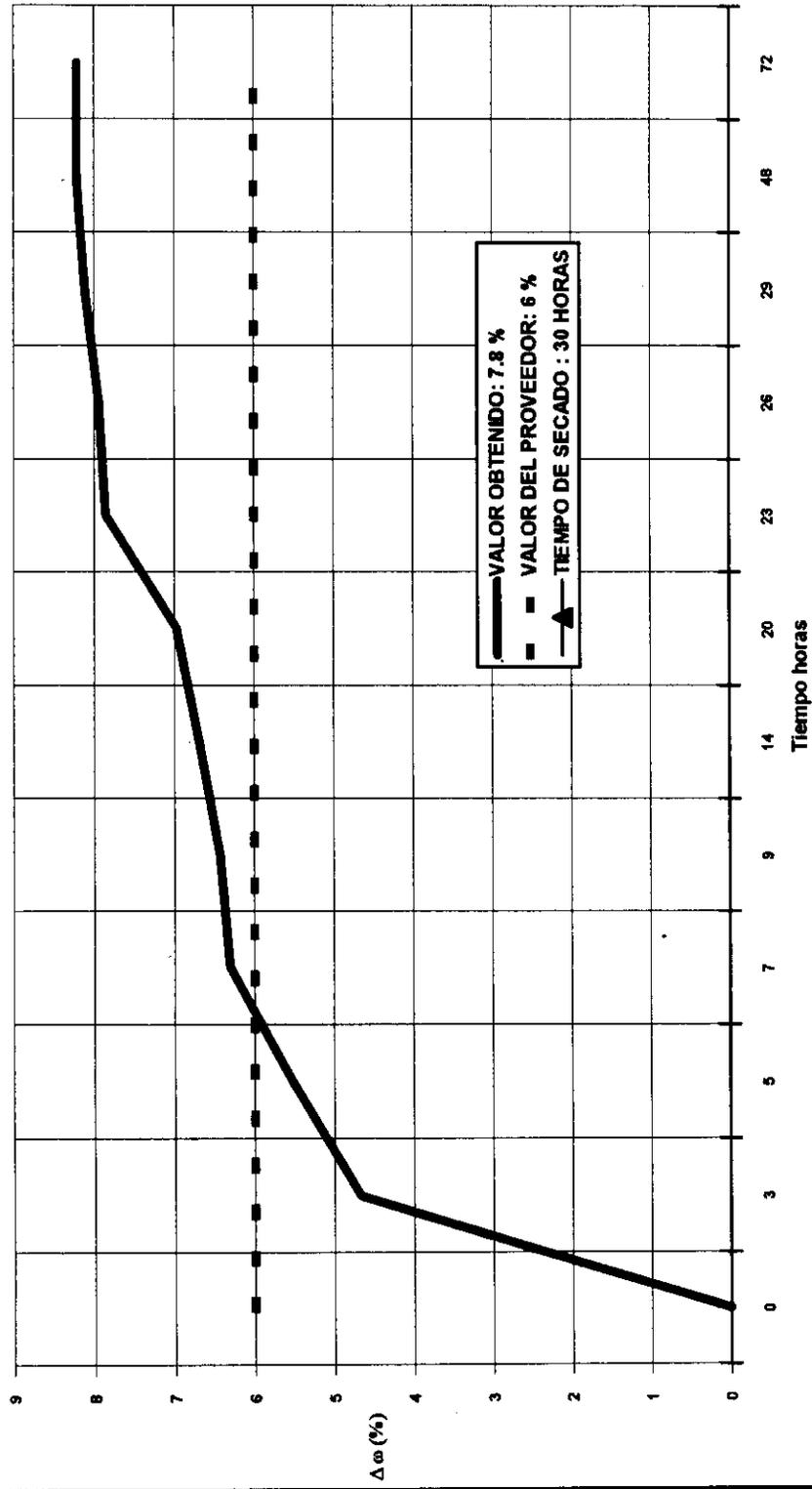
1. En un proceso de secado por calentamiento con temperatura de 100 °C y presión atmosférica, se analiza que el presspan se debe secar aproximadamente en 30 horas, la humedad que se extraída posteriormente es muy baja, por lo cual no es necesario continuar el secado ya que es muy costoso por el consumo de energía cuando la carga es muy alta.

2. El contenido de humedad del presspan de 2 mm obtenido durante este ensayo fue de 8.2 %, el cual es un valor elevado de acuerdo a los parámetros expuestos por el proveedor (6%), pero este se explica por el medio ambiente al que fueron sometidas estas muestras antes del secado, donde se presento una humedad relativa elevada (65 %) lo que hace que el papel adquiera humedad del medio.

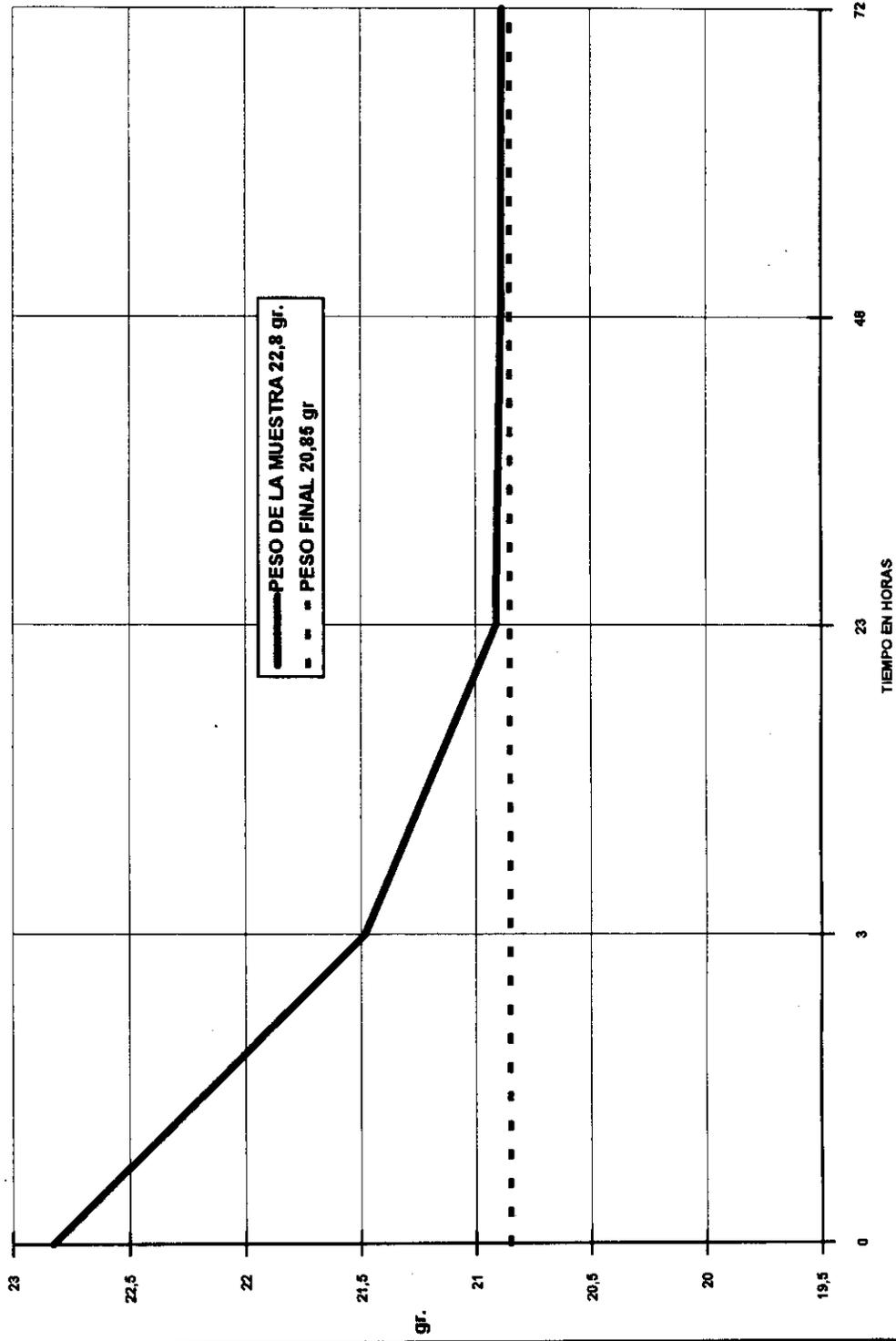
3. El secado al presspan sometido a 100 °C y presión atmosférica se puede suspender por lo menos a las 23 horas de iniciado el proceso cuando se necesita que la carga salga rápidamente del horno.

4. El tiempo de 30 horas de secado se considera muy elevado para un proceso de secado donde la producción sea elevada y se necesiten procesos productivos mas óptimos y rápidos, por lo cual se sugiere aumentar mas la temperatura lo que se expone en los siguientes ensayos.

CAMBIO DE PESO EN PORCENTAJE PARA EL PRESSAN DURANTE UN PROCESO DE SECADO CON TEMPERATURA
CONSTANTE DE 100 °C Y PRESION ATMOSFERICA



CAMBIO DEL PESO PARA EL PRESSPAN BAJO UN SECADO CON TEMPERATURA DE 100 °C Y PRESION ATMOSFERICA



6.2 ENSAYO DE SECADO AL PRESSPAN DE 2 mm (T = 120 °C).

6.2.1 Objetivo del Ensayo: Determinar humedad que se le puede extraer al presspan, durante un proceso de secado con condiciones especiales de presión y temperatura.

6.2.2 Condiciones del Ensayo: Para realizar dicho secado se necesita tener constante los siguientes parámetros:

Temperatura : 120 °C

Presión: 11,7 psi (Presión en Bogotá)

6.2.3 Uso del Presspan: El presspan es un compuesto higroscópico, obtenido de la celulosa que debe cumplir con las condiciones indicadas en la norma *DIN 7733*.

El presspan se usa en transformadores de potencia para elaborar:

1. Tabiques.
2. Cilindros.
3. Distanciadores.
4. Tacos.
5. Listones.
6. Portaconductores.

6.2.4 Norma Seguida: Estos ensayos fueron realizados siguiendo la norma NTC 334.

6.2.5 Equipos y Materiales Utilizados: Para realizar estos ensayos se utilizaron los siguientes elementos:

1. Muestras de papel presspan de 2 mm (15).
2. Balanza Analítica : MAGEMA VEB Großwagen Berlín.
3. Horno de secado : memmert. P1210
4. Pinzas de laboratorio
5. Termómetro: FLUKE
6. Termocupla tipo K.
7. Desecador

6.2.6 Procedimiento del Ensayo:

Se tomaron 15 muestras de papel presspan de 2 mm marca WEIDMANN, que cumple con las condiciones técnicas impuestas en la norma DIN 7733, posteriormente se pesaron e introdujeron al horno con las condiciones previamente descritas. Durante 72 horas se sometieron a calentamiento dichas muestras, midiendo periódicamente el peso y calculando el cambio de peso.

6.2.7 Valores Obtenidos:

Una vez finalizado el ensayo se procedió a calcular el cambio de peso en porcentaje haciendo uso de la ecuación 13.

Remplazando en esta ecuación se obtuvieron los siguientes valores:

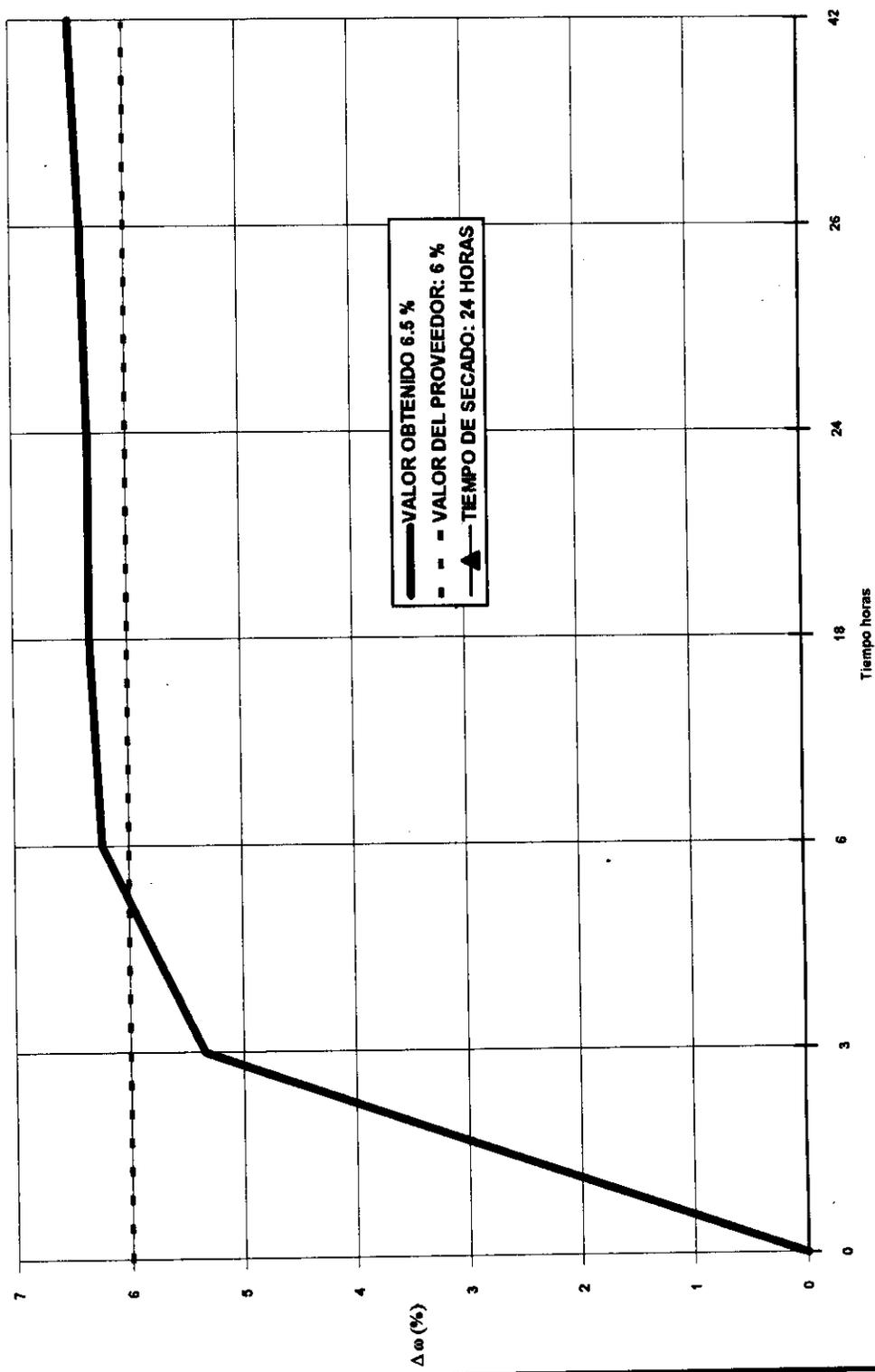
TABLA 14.

HORAS DE SECADO	Δw (%)
3	5,3372
6	6,2269
18	6,32525
24	6,3289
26	6,3807
42	6,4725

6.2.8 Conclusiones:

1. En un proceso de secado por calentamiento con temperatura de 120 °C y presión atmosférica, se analiza que el presspan se debe secar aproximadamente en 24 a 26 horas, la humedad que se extraída posteriormente es muy baja, por lo cual no es necesario continuar el secado ya que es muy costoso por el consumo de energía cuando la carga es muy alta.
2. El contenido de humedad del presspan de 2 mm extraído durante este ensayo de secado fue de 6.5 % del peso total, una valor mucho mas cercano al expuesto por el proveedor (6%), esto se debe a que esta muestra fue muy poco tiempo sometida a la humedad del ambiente.
3. El tiempo mínimo de secado es de 18 horas con temperatura de 120 °C y presión atmosférica, el cual es aun elevado para procesos productivos de alta producción, por lo cual se sugiere aumentar la temperatura a 145 °C.

CAMBIO DE PESO EN PORCENTAJE PARA EL PRESSEAN DURANTE UN PROCESO DE SECADO CON TEMPERATURA
CONSTANTE DE 120 °C Y PRESION CONSTANTE



6.3 ENSAYO DE SECADO AL PRESSPAN DE 2 mm (T = 145 °C).

6.3.1 Objetivo del Ensayo: Determinar humedad que se le puede extraer al presspan, durante un proceso de secado con condiciones especiales de presión y temperatura.

6.3.2 Condiciones del Ensayo: Para realizar dicho secado se necesita tener constante los siguientes parámetros:

Temperatura : 145 °C

Presión: 11,7 psi (Presión en Bogotá)

6.3.3 Uso del Presspan: El presspan es un compuesto higroscópico, obtenido de la celulosa que debe cumplir con las condiciones indicadas en la norma *DIN 7733* .

El presspan se usa en transformadores de potencia para elaborar:

1. Tabiques.
2. Cilindros.
3. Distanciadores.
4. Tacos.
5. Listones.
6. Portaconductores.

6.3.4 Norma Seguida: Estos ensayos fueron realizados siguiendo la norma NTC 334.

6.3.5 Equipos y Materiales Utilizados: Para realizar estos ensayos se utilizaron los siguientes elementos:

1. Muestras de papel presspan de 2 mm (15).
2. Balanza Analítica : MAGEMA VEB Großwagen Berlín.
3. Homo de secado : memmert. P1210
4. Pinzas de laboratorio
5. Termómetro: FLUKE
6. Termocupla tipo K.
7. Desecador

6.3.6 Procedimiento del Ensayo:

Se tomaron 15 muestras de papel presspan de 2 mm marca WEIDMANN, que cumple con las condiciones técnicas impuestas en la norma DIN 7733, posteriormente se pesaron e introdujeron al horno con las condiciones previamente descritas. Durante 72 horas se sometieron a calentamiento dichas muestras, midiendo periódicamente el peso y calculando el cambio de peso.

6.3.7 Valores Obtenidos:

Una vez finalizado el ensayo se procedió a calcular el cambio de peso en porcentaje haciendo uso de la ecuación 13.

Remplazando en esta ecuación se obtuvieron los siguientes valores:

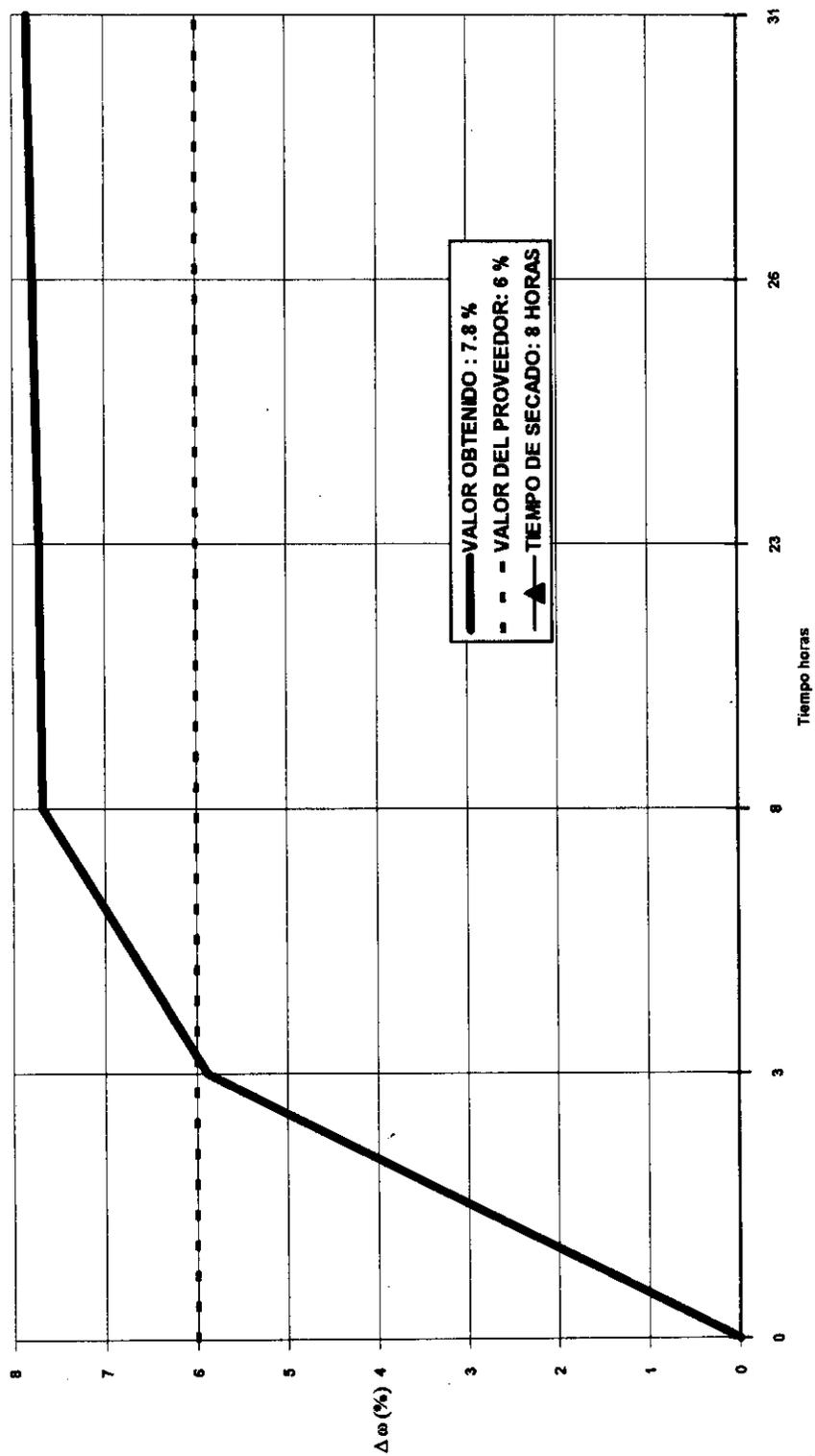
TABLA 15.

HORAS DE SECADO	Δw (%)
0	0
3	5,8848
8	7,6764
23	7,7110
26	7,7755
31	7,8416

6.3.8 Conclusiones:

1. En un proceso de secado por calentamiento con temperatura de 145 °C y presión atmosférica, se analiza que el presspan se debe secar aproximadamente en 8 a 10 horas, la humedad que se extraída posteriormente es muy baja, por lo cual no es necesario continuar el secado ya que es muy costoso por el consumo de energía cuando la carga es muy alta.
2. El contenido de humedad del presspan de 2 mm extraído durante este ensayo de secado fue de 7.8 % del peso total, una valor elevado debido a la humedad relativa del medio al que fue expuesto el presspan antes del secado.
3. El tiempo mínimo de secado es de 8 horas con temperatura de 145 °C y presión atmosférica, el cual es un tiempo ideal para procesos de producción elevada de transformadores.

CAMBIO DE PESO EN PORCENTAJE PARA EL PRESSAN DURANTE UN PROCESO DE SECADO CON TEMPERATURA
CONSTANTE DE 145 °C Y PRESION ATMOSFERICA



4. Temperaturas mas elevada a costo de menores tiempos de secado no se pueden implementar debido a que el papel se sobrecalienta y existe un debilitamiento del aislamiento que a disminuirá la vida útil del papel e incrementara el riesgo de fallas.

6.4 ENSAYO A LA MADERA KP:

6.4.1 Objetivo del Ensayo: Determinar el contenido de humedad y el tiempo de secado para la madera KP usada en transformadores de potencia, teniendo en cuenta condiciones especiales de secado.

6.4.2 Condiciones del Ensayo: El ensayo de secado se realizo con las siguientes condiciones:

1. Temperatura constante de 100 °C
2. Presión constante de 11,7 PSI

6.4.3 Uso de la Madera KP: La madera KP es un material aislante procedente de la celulosa, que se utiliza en transformadores de potencia para fabricar segmentos de presión.

6.4.4 Procedimiento del Ensayo: Se tomaron 2 muestras de madera KP, posteriormente se pesaron e introdujeron al horno con las condiciones previamente descritas. Durante 75 horas se sometieron a calentamiento dichas muestras, midiendo periódicamente el peso y calculando el cambio de peso.

6.4.5 Valores Esperados: Una vez finalizado el ensayo se procedió a calcular el cambio de peso en porcentaje haciendo uso de la ecuación 13.

Remplazando en esta ecuación se obtuvieron los siguientes valores:

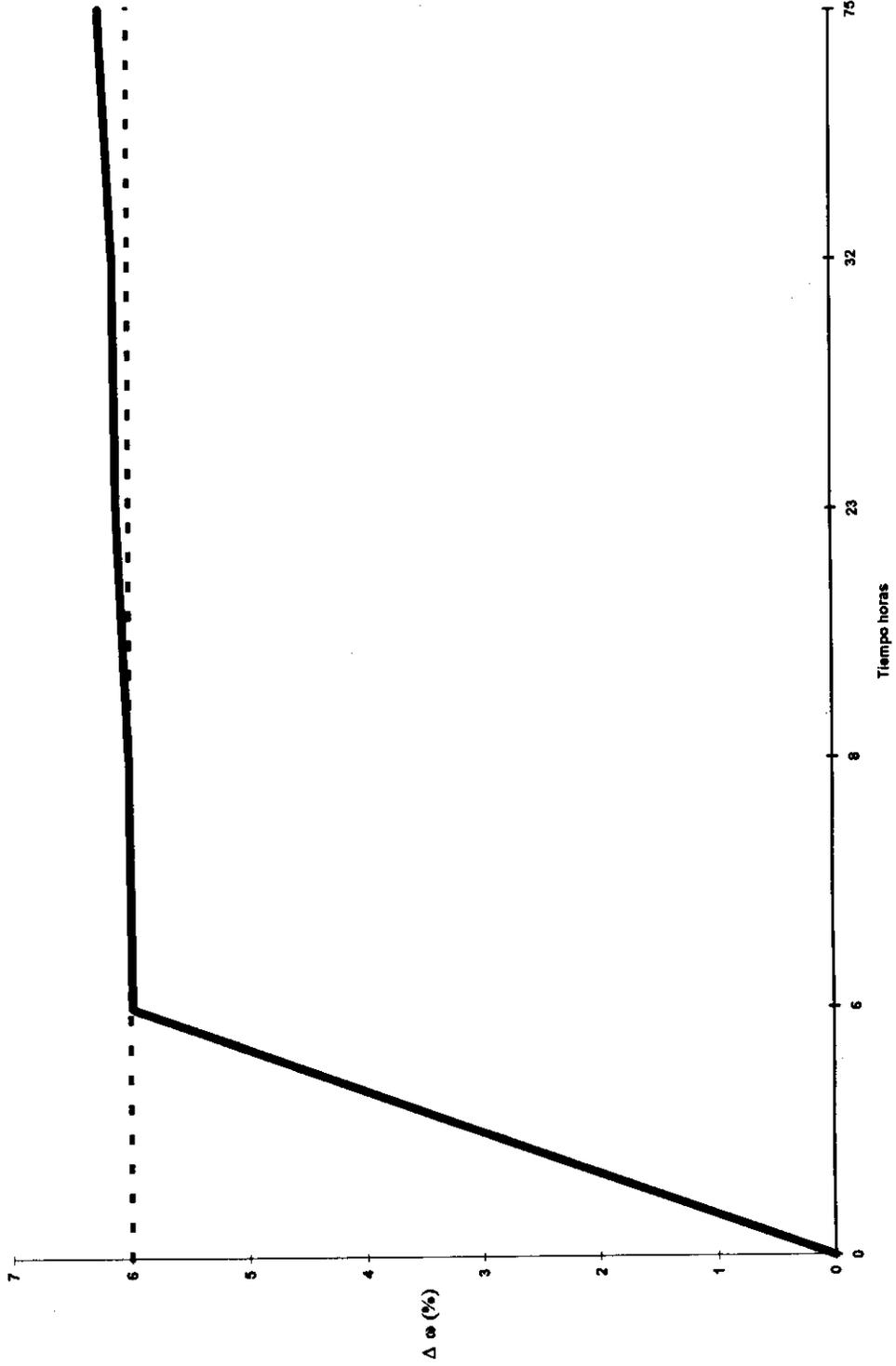
TABLA 16.

HORAS DE SECADO	Δw (%)
0	0
3	5,9814
8	6,0073
23	6,1033
32	6,1295
75	6,2353

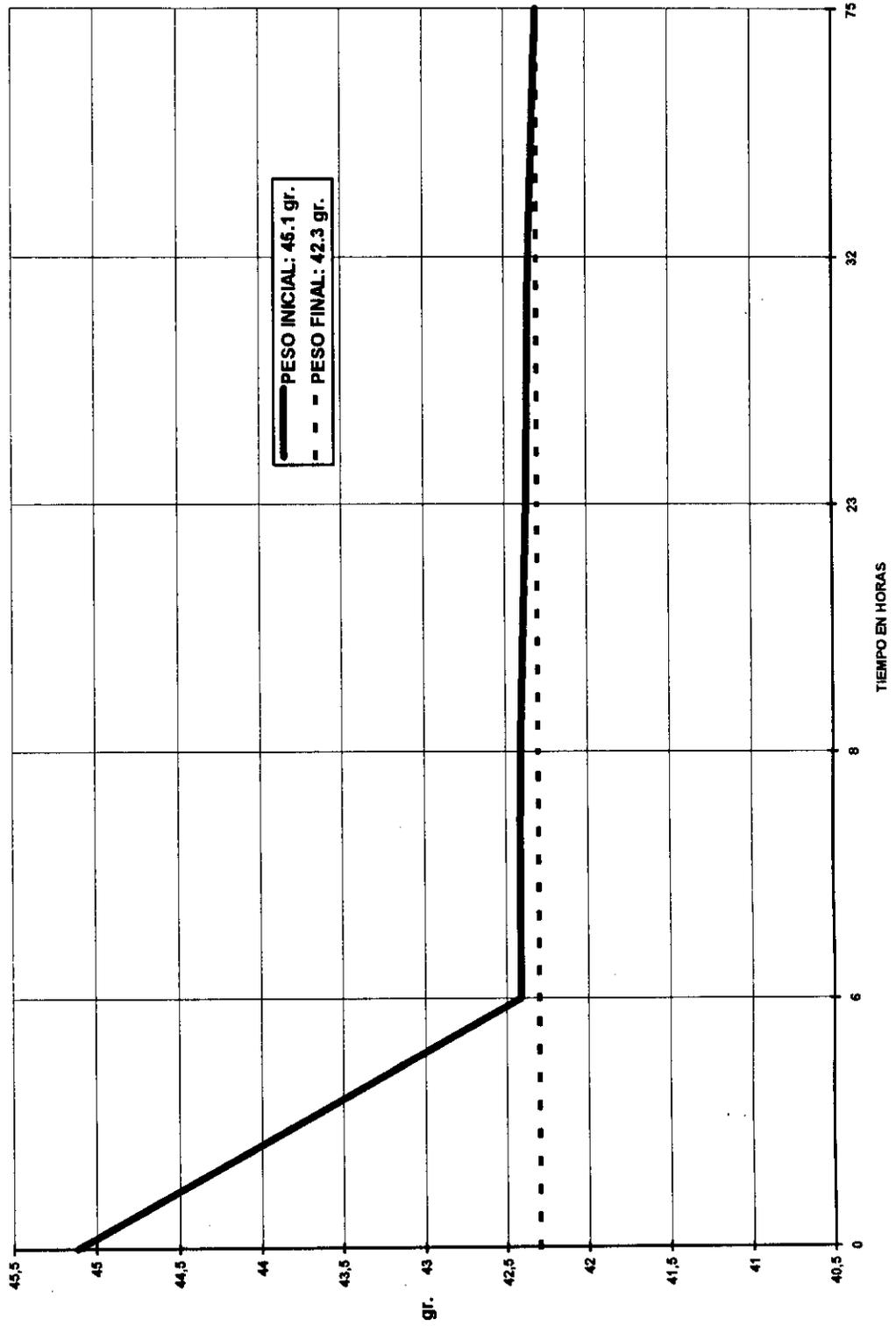
6.4.6 Conclusiones:

La madera KP a diferencia del papel presspan presenta un contenido de humedad mucho, el cual es fácil de extraer con temperaturas superiores a 100 °C, por lo cual se concluye que las partes del transformador fabricadas en base a la madera KP se están secando a las mismas 8 horas que se secará el presspan sometido a 145 °C.

CAMBIO DEL PESO EN PORCENTAJE PARA LA MADERA KP DURANTE UN PROCESO DE SECADO CON TEMPERATURA CONSTANTE DE 100 ° C Y PRESION ATMOSFERICA



CAMBIO DEL PESO PARA LA MADERA KP BAJO UN SECADO CON TEMPERATURA DE 100 °C Y PRESION ATMOSFERICA



6.5 ENSAYO DE $\tan\delta$ PARA TRANSFORMADORES TERMINADOS:

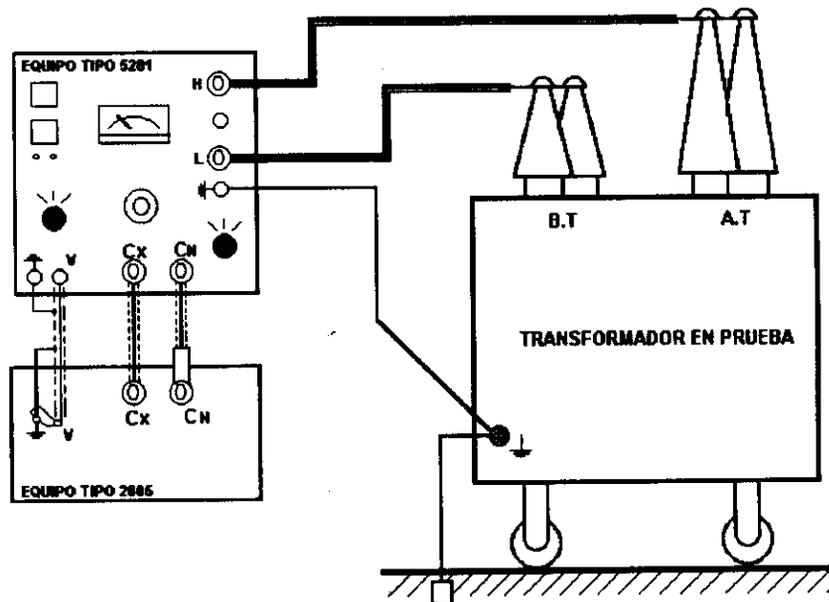
6.5.1 Objetivo del Ensayo: Este ensayo tiene por objeto medir las capacitancias y la $\tan\delta$ en transformadores de potencia terminados y determinar el valor máximo permisible de la $\tan\delta$.

6.5.2 Norma seguida: Para realizar este ensayo nos basamos en la norma ANSI C57.12.00 *General Requirements for Liquid Immersed Distribution, power, and Regulating Transformers.*

6.5.3 Equipos y Materiales Utilizados: Para realizar este ensayo se utilizo el equipo TETEX TIPO 5281 y el TETEX 2885, además se utiliza cableado especial para no introducir ruido en la prueba.

6.5.4 Procedimiento de Trabajo:

FIGURA 29.



PROCEDIMIENTO SEGUIDO PARA EL ENSAYO DE CAPACITANCIAS Y $\tan\delta$ EN FABRICA

1. Con el transformador debidamente terminado cortocircuitar los devanados de AT y BT.
2. Aterrizar el tanque del transformador.
3. Conectar el terminal HIGHT del equipo al devanado de AT y el terminal LOW del equipo al devanado de B.T
4. Comenzar a realizar cada una de las pruebas, teniendo la precaución de bajar la tensión del equipo de prueba en cada cambio de circuito (UST,GST, GSTg).

TRANSFORMADOR 1:

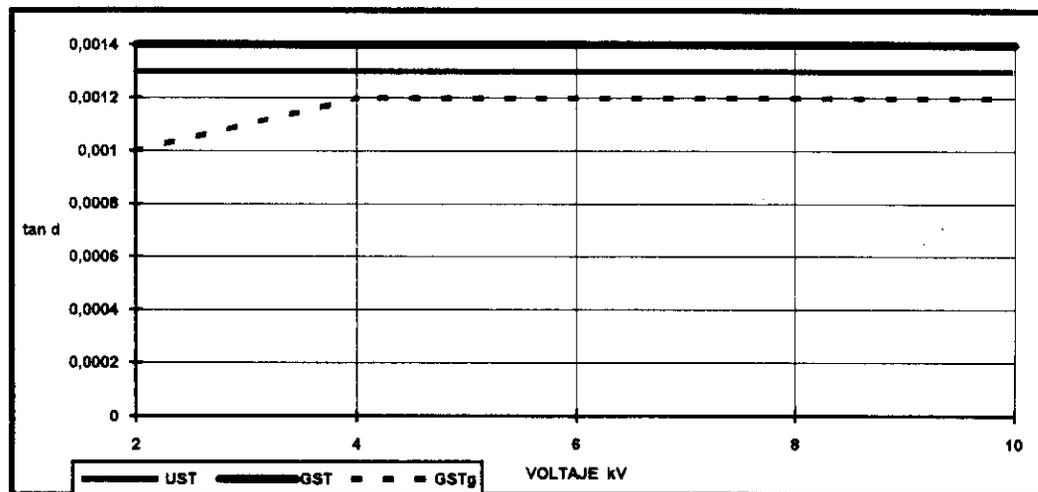
TENSION: 110/34.5 kV

POTENCIA: 46.55/58.45 MVA

TABLA 17.

VOLTAJE kV	UST (CHL)		GST(CHL+CH)		GSTg(CH)	
	tanδ	C(pF)	tanδ	C(pF)	tanδ	C(pF)
2	0.0013	8345	0.0014	12155	0.0010	3801
4	0.0013	8345	0.0014	12155	0.0012	3801
6	0.0013	8345	0.0014	12155	0.0012	3801
8	0.0013	8345	0.0014	12155	0.0012	3801
10	0.0014	8345	0.0014	12155	0.0012	3801

FIGURA 30.



VARIACION DE LA $\tan\delta$ RESPECTO AL VOLTAJE APLICADO.

TRANSFORMADOR 2:

TENSION: 115/34.5 kV

POTENCIA: 22.5/30 MVA

TABLA 18.

VOLTAJE kV	UST (CHL)		GST(CHL+CH)		GSTg(CH)	
	$\tan\delta$	C(pF)	$\tan\delta$	C(pF)	$\tan\delta$	C(pF)
2	0.00134	7620	0.00145	11350	0.00147	3790
4	0.00146	7620	0.00145	11350	0.00145	3790
6	0.00140	7620	0.00146	11350	0.00146	3790
8	0.00144	7620	0.00147	11360	0.00148	3790
10	0.00142	7620	0.00156	11360	0.00148	3790

FIGURA 31.

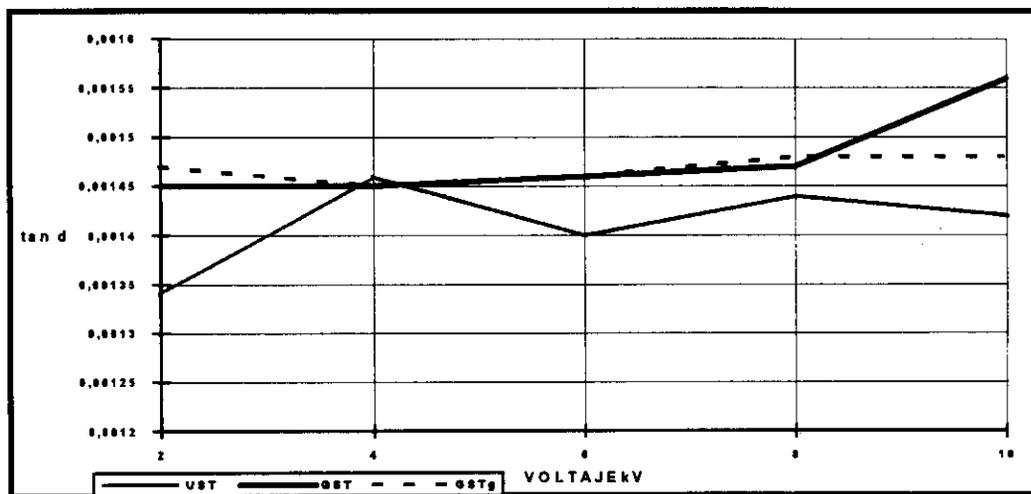
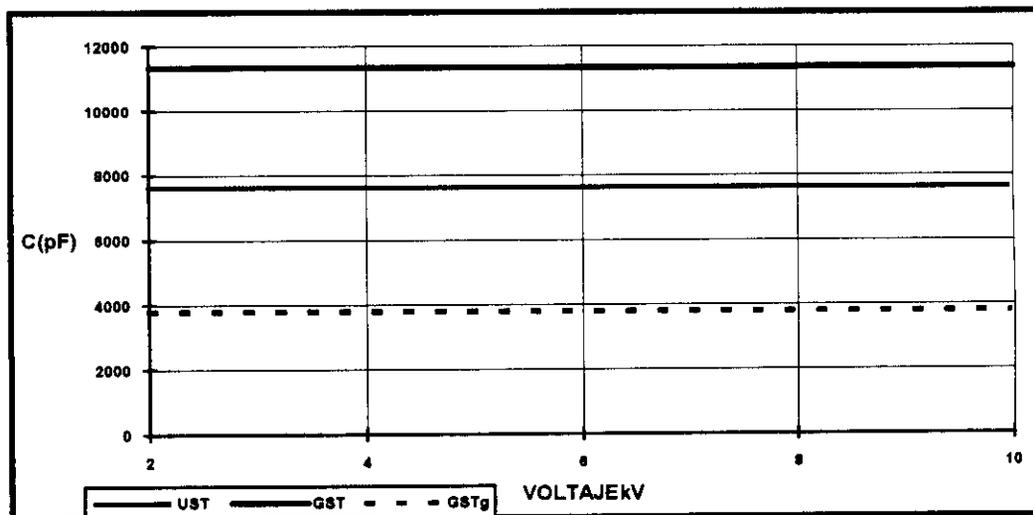
VARIACION DE LA $\tan\delta$ RESPECTO AL VOLTAJE APLICADO.

FIGURA 32.



VARIACION DE LAS CAPACITANCIAS CON RELACION AL VOLTAJE APLICADO.

TRANSFORMADOR 3:TENSION: 115/34.5 kVPOTENCIA: 22.5/30 MVA

TABLA 19.

VOLTAJE kV	UST (CHL)		GST(CHL+CH)		GSTg (CH)	
	tan δ	C(pF)	tan δ	C(pF)	tan δ	C(pF)
2	0.00163	7600	0.00167	11320	0.00184	3771
4	0.00167	7610	0.00186	11330	0.00184	3771
6	0.00187	7600	0.00280	11330	0.00184	3771
8	0.00208	7610	0.00212	11330	0.00184	3771
10	0.00208	7610	0.00217	11330	0.00184	3771

FIGURA 33.

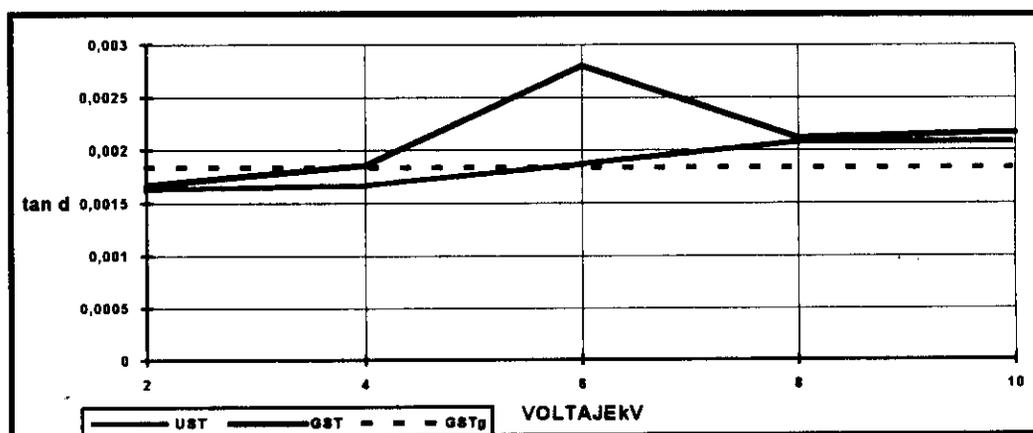
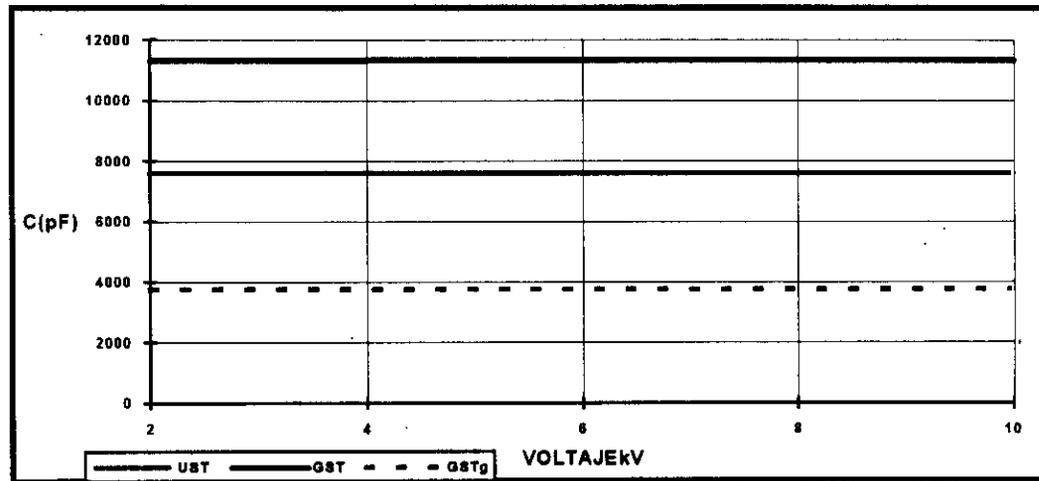
VARIACION DE LA tan δ RESPECTO AL VOLTAJE APLICADO.

FIGURA 34.



VARIACION DE LAS CAPACITANCIAS CON RELACION AL VOLTAJE APLICADO

(18) También es importante hacer notar que aunque los transformadores sean idénticos tanto mecánicamente, como eléctricamente los valores obtenidos en el ensayo aquí citado difieren. A continuación se muestran los valores obtenidos con seis transformadores de 115/34.5 kV , y 22.5/30 MVA, que fueron fabricados en el período de 1994 a 1995. Los datos aquí citados son con una tensión de prueba de 10 kV.

(18) Los resultados que se citan a continuación fueron producto de diversos ensayos de tangente delta y capacitancias realizados a transformadores, en SIEMENS de Colombia durante la época de 1994-1995.

TABLA 20.

TRANSFORMA DOR	UST (CHL)		GST(CHL+CH)		GSTg (CH)	
	tan δ	C(pF)	tan δ	C(pF)	tan δ	C(pF)
1	0.00142	7620	0.00156	11360	0.00148	3790
2	0.00208	7610	0.00257	11330	0.00184	3771
3	0.00178	7700	0.00190	11460	0.00200	3790
4	0.00169	6300	0.00210	10750	0.00230	4400
5	0.00176	6390	0.00200	10760	0.00248	4430
6	0.00232	7850	0.00230	11560	0.00230	3770

FIGURA 35.

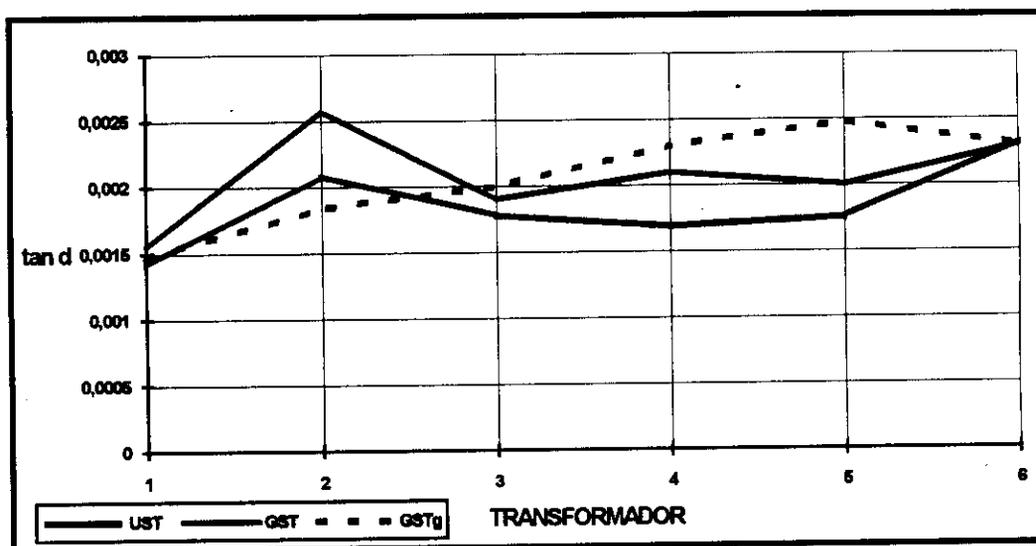
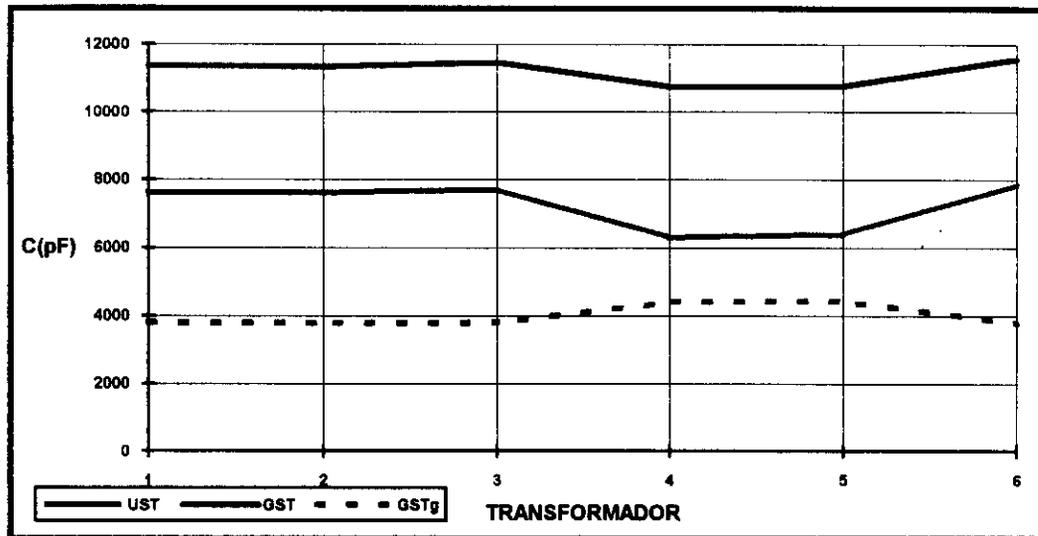
VARIACION DE LA tan δ EN DIVERSOS TRANSFORMADORES DE CARACTERISTICAS SIMILARES.

FIGURA 36.



CAPACITANCIAS PARA TRANSFORMADORES DE CARACTERISTICAS SIMILARES.

6.5.5 Conclusiones:

1. Es de observar que un incremento en el valor de la capacitancia viene seguido de un aumento en el valor de la $\tan\delta$, debido a que un tener un elevado contenido de humedad afecta tanto a la capacitancia, como a la $\tan\delta$.
2. Como ya se anoto el valor de la $\tan\delta$ no es predecible con exactitud, ya que es un valor que se ve muy afectado por el modo en que se realizo el proceso de secado a el transformador, y aunque tengamos transformadores idénticos no se presentara el mismo valor de factor de disipación ya que sus aislamientos no estuvieron sometidos exactamente a las mismas condiciones ambientales, y el proceso de secado aunque sea el mismo caso no será idéntico en sus etapas. Lo mas adecuado no es buscar el valor del factor de disipación si no un comportamiento a una tendencia (Ver figuras 20,21 y 22).

3. Se debe esperar valores de $\tan\delta$ lo mas bajos posibles en transformadores nuevos (max 0.05), ya que fueron recientemente sometidos a procesos de secado.

4. Los ensayos descritos en este documento fueron realizados a frecuencia de 60 Hz, no se deben esperar valores similares con frecuencias diferentes ya que el factor de disipación es función de la frecuencia, como se mostró en el capítulo 5 de la presente obra, ecuación 5 , pero la dependencia que tiene el factor de disipación con la frecuencia no se trata en este trabajo por ser una temática que sale del tema genérico del presente documento, los transformadores.

6.6 ENSAYO DE $\tan\delta$ AL PAPEL:

Este ensayo no se pudo realizar por ausencia del equipo, para remplazarlo se tomaron los valores obtenidos y expuestos en el libro de *Roth Arnol: Técnica de la Alta Tensión*.

6.6.1 Norma seguida: Dicho ensayo esta regido bajo la norma *ASTM D-150-87* .

Se tienen los siguientes resultados:

TABLA 21.

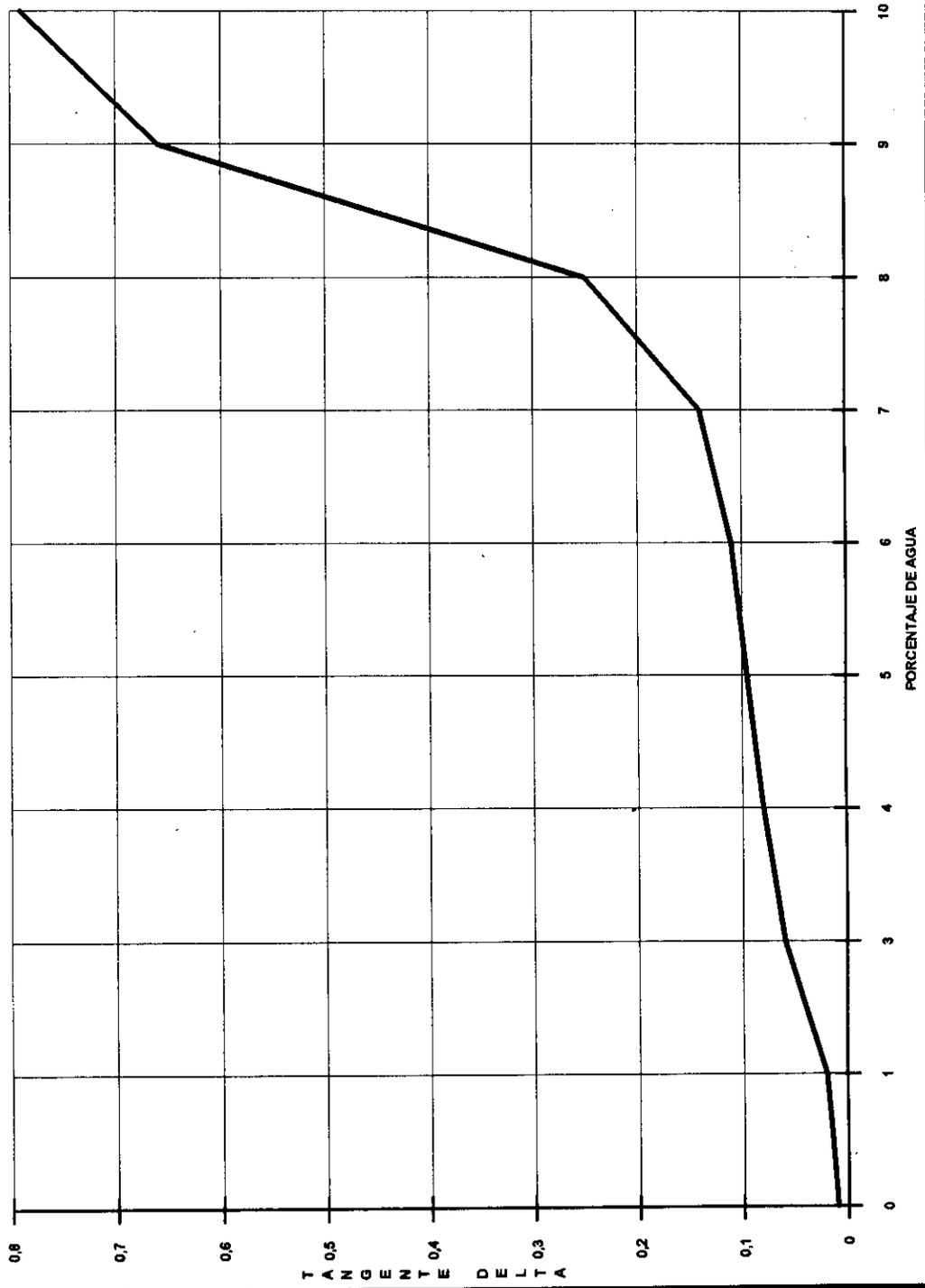
AGUA ABSORBIDA % DEL PESO EN SECO	tanδ (Papel no impregnado)	tanδ (Papel impregnado con parafina)
0	0,010	0,010
1	0,020	0,050
3	0,060	0,070
4	0,080	0,090
5	0,095	0,095
6	0,110	0,130
7	0,140	0,170
8	0,250	0,210
9	0,660	0,310
10	0,790	0,760

Estos resultados fueron graficados y se obtuvieron las siguientes tendencias:

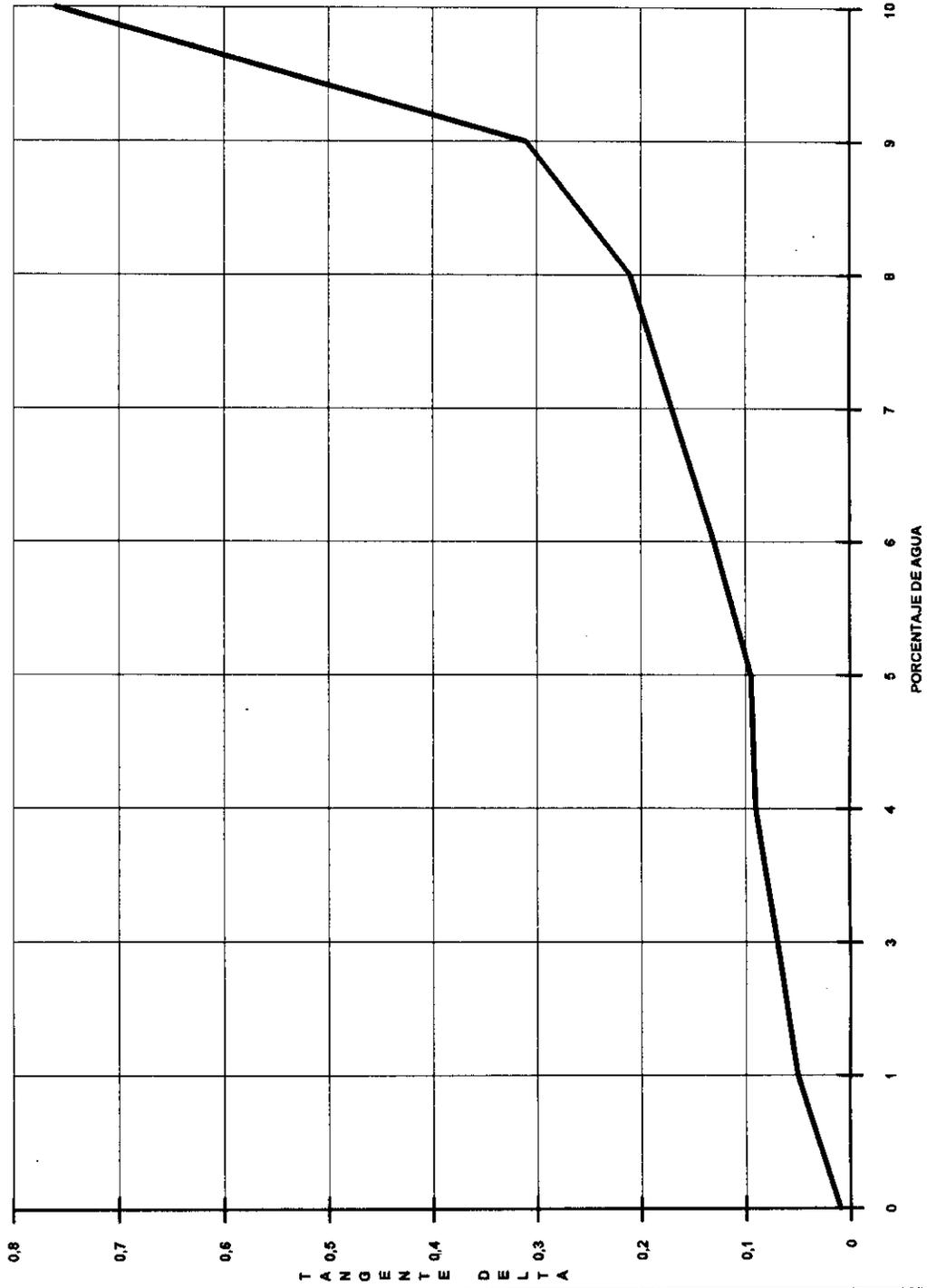
6.6.2 Conclusiones:

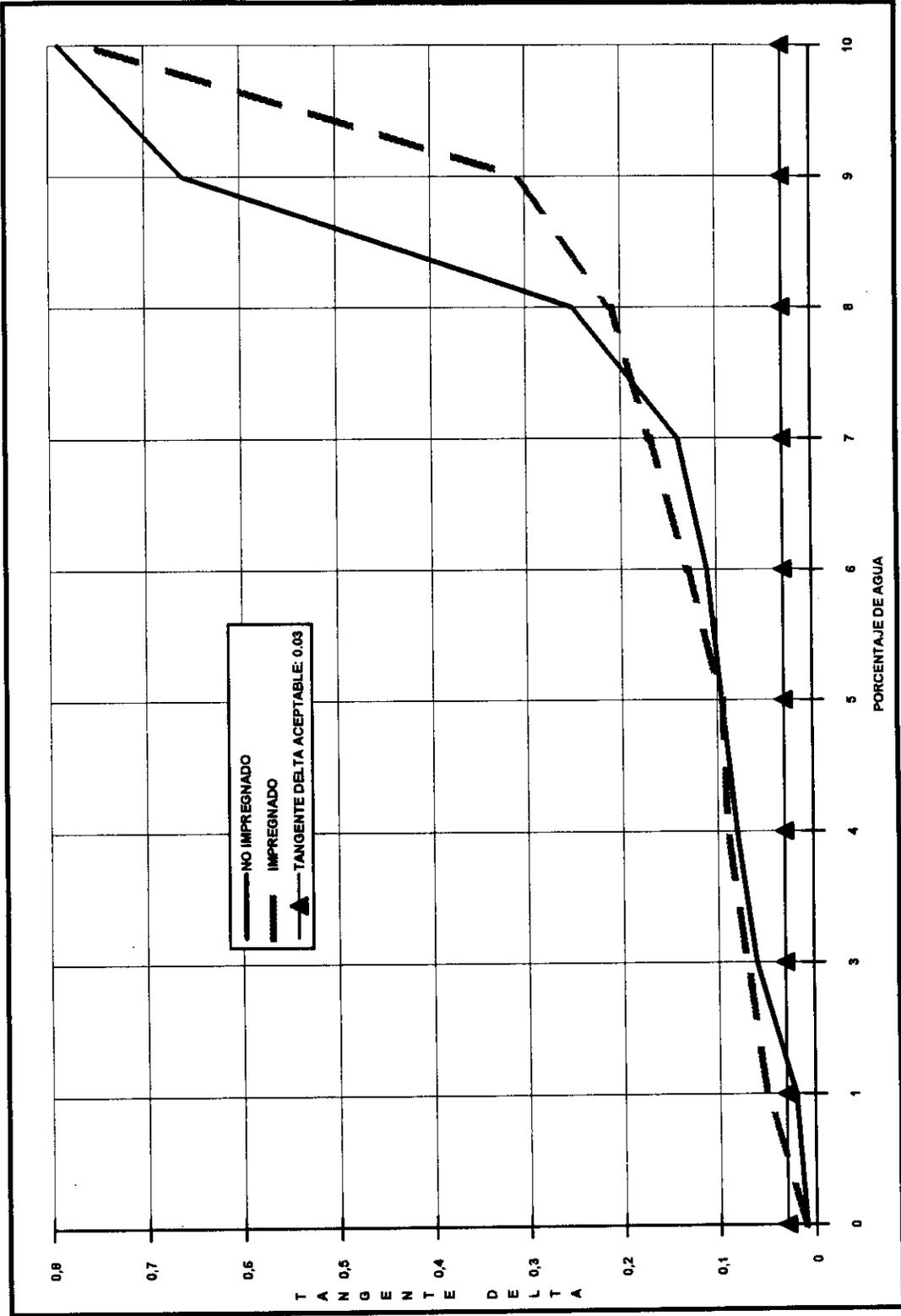
1. Se observa claramente que el papel no impregnado en aceite presenta un factor de disipación mas elevado que el papel impregnado, lo cual es un aspecto importante de considerar en fabrica ya que se trata con papel, inicialmente sin impregnar.
2. Es facilmente observable que un elevado contenido de agua aumenta el valor de la $\tan\delta$, y que el valor máximo permisible de contenido de humedad es del 1 % del peso total de los aislamientos.
3. El valor maximo tolerable de $\tan\delta$ para el papel, ya sea impregnado o no es de 0.03 que corresponde a un 1% de humedad.

TANGENTE DELTA CON PAPEL NO IMPREGNADO



TANGENTE DELTA CON PAPEL IMPREGNADO





7. CONCLUSIONES GENERALES.

Esta parte final del presente trabajo tiene como objetivo aclarar aspectos no tratados en el capítulo anterior, donde solo se concluyen los resultados de los ensayos realizados a través del período de investigación.

1. Es de gran importancia conocer el transformador con el que estemos trabajando, ya sea en periodo de fabricación, pruebas eléctricas o montaje. Identificar los accesorios que debe llevar, la forma en que se instalan y las condiciones de servicio que deben tener. Es necesario hacer regular inspección del rele Buchholz y del deshumectador de aire, vigilando el estado de los contactos, tanto de alarma como de disparo, y que no se presenten fisuras lo que provoca falla de hermeticidad en el transformador. En el deshumectador de aire llevar control del estado de la silicagel teniendo en claro que cuando esta presenta un color rosado se debe someter a un tratamiento de secado, que consiste en calentarla paulatinamente de 0 °C a 150 °C hasta que recobre su color normal azul oscuro.

2. Antes de efectuar cualquier ensayo eléctrico a un transformador, tanto en fabrica como en campo, debe tenerse claro conocimiento de los siguientes aspectos:

2.1 Temperatura del ambiente: Todo ensayo eléctrico debe referirse con una temperatura ambiente de 20 °C. Cuando no se pueda tener esta condición es necesario aplicar factores o ecuaciones de corrección por temperatura.

2.2 Humedad Relativa de medio ambiente: Este aspecto es de importancia en pruebas al aceite y en el ensayo que determina el efecto corona en el transformador, (descargas parciales).

Es necesario conocer el material con el cual fueron fabricados los devanados (cobre o aluminio), ya que para cada material existe una determinada ecuación de corrección por temperatura.

Drenar siempre el relé Buchholz antes de las pruebas eléctricas para que éste pueda actuar ante una eventual sobrepresión.

3. Cuando se vayan a realizar ensayos eléctricos o se este realizando interventoria de los mismos, debe tenerse claro conocimiento del ensayo a realizar, conocer las normas que lo rigen y exigir al proveedor el conocimiento de éstas. Generalmente todos los transformadores de potencia fabricados para trabajar en el país o en cualquier parte del mundo deben estar sometidos a la norma ANSI C57. DISTRIBUTION, POWER AND REGULATION TRANSFORMERS, o a la NORMA IEC 76 POWER TRANSFORMERS.

4. Realizar periódicamente a un transformador de potencia una serie de ensayos conocidos como pruebas de campo, teniendo especial cuidado en el ensayo de medida de resistencia del aislamiento, ya que con este ensayo se determina el índice de polarización el cual es

un factor de mucho peso en la decisión sobre el estado de los aislamientos del transformador.

5. Exigir que se realice la prueba de factor de potencia del aislamiento ya que nos da una gran medida del estado de los aislamientos del transformador en lo relacionado al contenido de humedad y contaminantes. Cuando el factor de potencia es mayor al 2 %, el transformador debe ser sacado de servicio y ser sometido a otros ensayos para determinar la causa del elevado factor de potencia.

6. En lo relacionado con los métodos de secado en fabrica se hacen los siguientes comentarios, refiriéndonos básicamente a los métodos de aplicación de calentamiento únicamente y el método de calentamiento con aplicación de vacío.

6.1 Método de Calentamiento : Se debe realizar el calentamiento gradual del transformador con el objetivo de secar de afuera hacia el interior de nuestro transformador. Nunca aplicar mas temperatura que la de secado ($145 \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$), ya que puede suceder lo siguiente:

Se realizaría un secado superficial, no se calienta la parte interna del transformador lo que podría provocar falla del transformador (Cortocircuito en alta tensión).

Se esta sobrecalentando el papel lo que disminuye la vida útil del aislamiento, se desprenden grandes cantidades de monóxido y dióxido de carbono (CO y CO_2). Cuando se involucra una estructura impregnada de aceite se detecta también la presencia de Metano (CH_4) y Etileno (C_2H_4).

Este método de secado se ve muy afectado por la humedad relativa del medio ambiente ya que esta nos limita la cantidad de humedad extraída, debido a que estamos secando a presión atmosférica. Este secado no suele ser muy utilizado en transformadores de potencia debido a su baja confiabilidad y para que se tengan buenos resultados se necesita bastante tiempo de secado (por lo menos 360 horas).

6.2 Secado por Calentamiento y Aplicación de Vacío: Método de secado utilizado en la fabricación de transformadores de potencia del cual se ha observado lo siguiente:

Es necesario aplicar el calentamiento de una forma progresiva hasta alcanzar la temperatura exigida por la norma TUF 1113. Para los devanados 100 °C mínimo y para el núcleo 90 °C.

Al aplicar el vacío hacer inspecciones con el objeto de corroborar que se haya logrado el vacío exigido y que este se mantenga durante todo el proceso.

Nunca abrir la puerta del horno durante la etapa de secado ya que se introducirá humedad al transformador la cual alargará nuestro proceso de secado.

Tener claras y diferenciadas las etapas en el proceso de secado por calentamiento y aplicación de vacío:

1. Tiempo de calentamiento
2. Tiempo de secado
3. Tiempo de espera

4. Secado Intermedio

5. Encubado, vacío y llenado de aceite

7. En un control de secado mediante la medida del factor de pérdida de los aislamientos se debe esperar una disminución de este parámetro hasta valores de 0.0015 que son comunes en transformadores recientemente secados en fabrica. El transformador ya esta seco y puede ser extraído del horno para trabajos de terminado, cuando la $\tan\delta$ se estabiliza en 0,0015 aproximadamente y no tiene mayor disminución.

8. Es importante entender que la forma de la gráfica de la $\tan\delta$ en un proceso de secado donde se tenga control por medición del factor de potencia de los aislamientos será la misma en todo secado realizado bajo norma, pero habrá diferencia tanto en la magnitud de la $\tan\delta$, como en el tiempo de extracción de la humedad, ya que el proceso se ve afectado por las condiciones del aislamiento las cuales varían con el medio ambiente al que fueron sometidos.

Como comentario final al presente trabajo, quiero indicar que implementar un control de secado mediante medición del factor de potencia de los aislamientos es un método de control muy confiable por las razones ya explicadas, implicando una inversión elevada para un proceso de secado ya implementado por requerir cambios en el sistema de instrumentación, y una menor inversión en un proceso de secado a implementarse, donde pueden tenerse en cuenta requerimientos prácticos para la medición del factor de potencia.

BIBLIOGRAFIA

- A.L.RICKLEY.** An Introduction to Preventive Maintenance Testing of electric power apparatus insulation. 1984
- ACIEM.** Actualización en Transformadores: Comisión de energía;Santafé de Bogotá
Abril 27,28 y 29 de 1995.
- AMERICAN NATIONAL STANDART.** Test Code for Liquid Inmersed Distribution power and regulating transformers and guide for short circuit testing of distribution and power transformers: New York
(Norma de U.S.A, ANSI C 57.12.90-1993)
- AMERICAN NATIONAL STANDART.** Dry type distribution transformes: New York, 1990
(Norma de U.S.A, ANSI C 57.12-01-1990)
- AMERICAN NATIONAL STANDART.** General Requeriments for liquid-inmersed distribution, power, and, regulating transformers: New York 1992.
(Norma de U.S.A, ANSI C 57.12.00-1992)
- AMERICAN NATIONAL STANDART.** Guide for transformers impulse test. New York, 1990
(Norma de U.S.A, ANSI C 57.98-1990)
- AMERICAN NATIONAL STANDART.** Guide for partial discharge measurent in liquid-filled power transformers and shunt reactors. New York 1991
(Norma de U.S.A, ANSI C 57.113-1991)
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS.** Standart Test Methods for A.C loss characteristics and permitivittivity (Dielectric Constant) of solid electrical insulating materials, New York 1987
(Norma de U.S.A, ASTM D-150-87)
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS.**Standard Specification for electrical insulating board. New York, 1981
(Norma de U.S.A, ASTM D-4063-81)
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS.**Standard specification for electrical insulating paper and paperboard-sulfate (Kraft) laye tipe. New York 1987
(Norma de U.S.A, ASTM D 1305-87)
- CABELLO B Jesus.** Diagnostico precoz de fallas en transformadores de potencia.
PURAMIN S.A
- CABELLO B Jesus.** Mantenimiento preventivo de transformadores de potencia.

PURAMIN S.A

CASTELFRANCHI, Giuseppe. Instalaciones Eléctricas, Barcelona
Editorial, Gustavo Gili, Pag 81-89, 1981

COOPER, David. Instrumentación electrónica y mediciones. Bogotá, Editorial
PRENTICE/HALL, segunda edición, 1978, pag. 127-132

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TECNICAS. Transformadores. Ensayo de
calentamiento para transformadores sumergidos en liquido refrigerante con
elevación de temperatura en los devanados. 1995
(Norma Colombiana, NTC 316)

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TECNICAS. Transformadores de potencia
terminología. 1995
(Norma Colombiana, NTC 317)

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TECNICAS. Papel y Cartón. Método para
determinar la humedad por secado en el horno. Bogota 1970
(Norma Colombiana, NTC 334)

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TECNICAS. Relación de transformación
verificación de la polaridad y relación de fase, 1995
(Norma Colombiana, NTC 471)

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TECNICAS. Aptitud de soportar el cortocircuito.
1995
(Norma Colombiana, NTC 532)

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TECNICAS. Determinación de la tensión de
cortocircuito, 1995.
(Norma Colombiana, NTC 1005)

GALLO, MARTINEZ Ernesto. Diagnostico y mantenimiento de transformadores en campo.
TRANSEQUIPOS LTDA.

GIRALDO Orlando. Pruebas Eléctricas a transformadores de potencia.
SIEMENS S.A, 1988

OESH. G. Oil-Spray-Trocknung von Transformatoren
MICAFIL, Zürich (Schweiz)

RAMIREZ, José. Estaciones de transformación y distribución, protecciones de sistemas
eléctricos; Barcelona, Editorial CEAT 1972

ROTH Arnold. Técnica de Alta Tensión, Editorial LABOR, 1966



SCHILLO, A. Tablas para Electrotecnia; Barcelona, Editorial, REVERTE 1964, Pag 186.

S.D. MYERS, J.J KELLY, R.H PARRISH. Guide to transformer Maintenance
T.M.I Akron, Ohio 1981

S.D MYERS. How Transformers Life is Measure. TMI Akron Ohio, 1986

SIEMENS AG TWN. Drying Transformers and Reactors as fron 2 MVA. Berlin 1994
(Procedimiento de trabajo aleman, TUF 1113)

VERDBAND DEUTSCHER ELEKTROTECHNIKER. Regeln für Prüfverfahren an Schicht
preßstoffen. Preßspan für die Elektechnik, Berlin
(Norma Alemana, VDE 0315/10.58)

ANEXOS

ANEXO 1.

BOMBAS ROOTS : Estas bombas también se denominan depresores, pues en principio se empleaban para suministrar aire a baja presión; su aplicación a la obtención de vacío fue posterior, si bien, con la importancia que en este sentido fue adquiriendo su uso, empezaron a fabricarse exclusivamente para este último objeto. En la actualidad su empleo es extensísimo, dado que resultan ideales para aspirar grandes volúmenes de gas entre 10 y 0.02 Torr, y es precisamente con presiones de este orden con las que se efectúa la moderna metalurgia al vacío. Con respecto a las bombas de paletas o de pistón oscilante, presentan las ventajas siguientes:

1. Pueden construirse con volúmenes de aspiración mucho mayores (6000 y 7000 m³/h).
2. El vacío que producen es seco, pues al no existir roce mecánico, no es necesario lubricar las piezas que aspiran los gases y por tanto no se forman vapores.

La fabricación de bombas de tipo Roots se orienta principalmente a la obtención de altos grados de vacío, para lo cual se hace que los ejes de apoyo de los émbolos, así como el motor de accionamiento, trabajen en condiciones de vacío, evitándose de esta forma las fugas a través de los ejes y sobre todo a través del motor.

Ventajas:

Obtención de un vacío seco, a presiones de 0.001 Torr; aspiración de grandes volúmenes de gas a presiones entre 20 Torr y 0.001 Torr, con poco consumo de energía; gran robustez mecánica y desgaste casi nulo de los émbolos.

Desventajas:

Construcción mecánica de gran precisión; gran sensibilidad a la penetración de un cuerpo duro entre sus émbolos; incapacidad de aspirar a la presión atmosférica, para lo que se precisa una bomba primaria conectada en tándem.

ANEXO 2.

PRUEBAS ASTM A LOS ACEITES AISLANTES

METODO DE PRUEBA	CRITERIOS PARA EVALUAR RESULTADOS	INFORMACION QUE SUMINISTRA LA PRUEBA
RIGIDEZ DIELECTRICA ASTM D-877/D-1816	Aceptable: 30 Cuestionable. 25-30 Inaceptable: < 25	Contenido de impurezas conductoras (Agua)
NUMERO DE NEUTRALIZACION ASTM D-974 (mg KOH/gm)	Aceptable: <=0.05 Cuestionable: 0.06 - 0.1 Inaceptable. > 0.1	Acidos presentes (Iodos)
TENSION INTERFACIL ASTM D-971(Dinas/cm)	Aceptable >= 32 Cuestionable = 28 - 31.9 Inaceptable >= 3.5	Compuestos hidrofílicos o contendio de acidos
COLOR ASTM D-1524	Aceptable <=3.5 Inaceptable > 3.5	Un cambio brusco en un año indica una anomalía
CONTENIDO DE AGUA D-1533 (ppm)	Aceptable < 30 Cuestionable = 30 - 34.9 Inaceptable >= 35	Indica el contenido total de agua en el aceite.
GRAVEDAD ESPECIFICA ASTM D-1298	Aceptable : 0.84 - 0.91 Cuestionable < 0.84 Inaceptable > 0.91	Densidad del aceite
NIVEL DE INHIBIDOR ASTM D-4768	0.08 para el aceite tipo 1 0.3 para el aceite tipo 2	Nivel de defensas contra productos de oxidación
FACTOR DE POTENCIA A 25 °C ASTM D-924	0.05 % maximo para el aceite nuevo	Indica agua contenida, o contendio de acidos extraños.

FIGURA 13.

CONTENIDO DE HUMEDAD EN EQUILIBRIO
PARA LA MADERA Y EL PAPEL KRAFT

