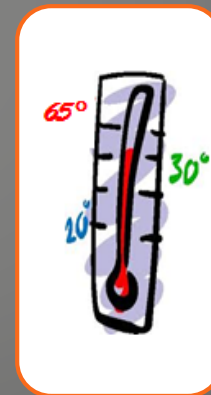
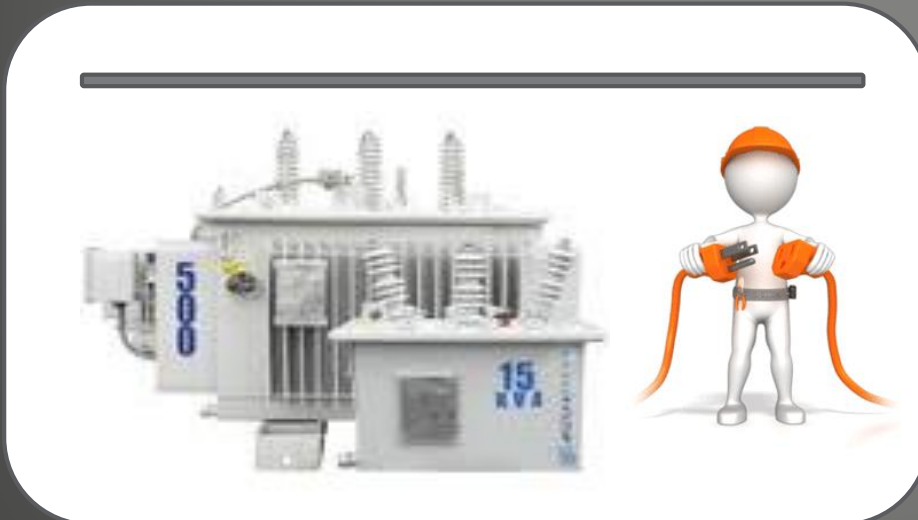


DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA PARA AUTOMATIZAR LA PRUEBA DE CALENTAMIENTO EN TRANSFORMADORES DE DISTRIBUCIÓN SUMERGIDOS EN ACEITE BAJO LA NORMA ANSI C 57.12.90 Y ESTUDIO DE UN MÉTODO ALTERNATIVO PARA DISMINUIR LOS TIEMPOS DE EJECUCIÓN DE LA PRUEBA BASADO EN EL MODELO TÉRMICO PARA LA EMPRESA ECUATRAN S.A.



POR : FABRICIO CHERRES
BLADIMIR SARABIA

CONTENIDO

2

□ OBJETIVOS

□ DESARROLLO

□ INTRODUCCIÓN

- ❖ El transformador.
- ❖ El transformador de distribución (IEEE C57.12.80-2002).
- ❖ Pruebas eléctricas a transformadores de distribución.
- ❖ Prueba de calentamiento (ANSI/IEEE C 57.12.90-2010).
- ❖ Métodos para la prueba de calentamiento.
- ❖ Condiciones generales para la prueba de calentamiento.
- ❖ Preparación de la prueba.

CONTENIDO

3

- ❖ Ensayos preliminares.
- ❖ Ejecución de la prueba de calentamiento con el equipo diseñado.
- ❖ Método alternativo para la ejecución de la prueba de calentamiento.

□ **CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

□ **REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

□ OBJETIVO GENERAL

- Diseñar e implementar un sistema para automatizar la prueba de calentamiento en transformadores de distribución sumergidos en aceite bajo la norma ANSI C 57.12.90 e implementar un método alternativo para disminuir los tiempos de ejecución de la prueba basada en el modelo térmico del transformador.

□ OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Investigar y ejecutar el método actual para la realización de la prueba térmica.
- Investigar alternativas que permitan disminuir el tiempo de la prueba térmica.

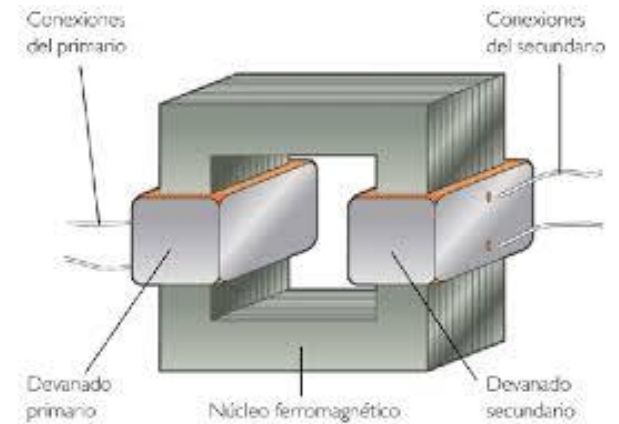

- Buscar instrumentos y equipos de medición para conseguir garantizar el registro de datos importantes para el análisis de resultados.
- Diseñar el software para automatizar el proceso.
- Diseñar los circuitos de control y potencia para la automatización del proceso.
- Implementar el software desarrollado con los circuitos de control y potencia.
- Ejecutar la prueba bajo la norma IEEE C57.12.90 usando el sistema de automatización desarrollado.
- Ejecutar la prueba con el proceso alternativo investigado usando el sistema de automatización desarrollado.

- Debido a la tendencia de crecimiento de la empresa, la demanda de transformadores de distribución y a las nuevas exigencias de los clientes, ECUATRAN S.A. tiene que desarrollar continuamente nuevos diseños de transformadores, debido a esto la prueba de calentamiento se ejecuta con mayor frecuencia a nuevas especificaciones para levantar un registro que retroalimenta al área de Ingeniería y se pueda validar dicha especificación.
- La prueba térmica a transformadores sumergidos en aceite en forma resumida consiste en energizar el transformador a las pérdidas totales. Las pérdidas totales de un transformador deben ser la suma de las pérdidas con carga y las pérdidas sin carga y se determina el incremento máximo de temperatura del aceite, medido directamente, y el incremento máximo de temperatura en la parte activa (punto más caliente), valor determinado teóricamente, éste incremento de temperatura no debe ser superior a 65°C.



EL TRANSFORMADOR

El transformador es una máquina eléctrica, que por inducción electromagnética transfiere energía eléctrica de un circuito a otro de la misma frecuencia, usualmente elevando o disminuyendo el nivel de voltaje y corriente.



TRANSFORMADOR DE DISTRIBUCIÓN

IEEE C57.12.80-2002

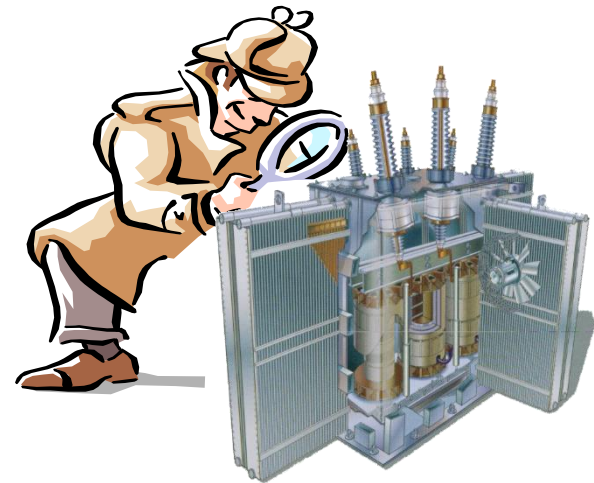
- Es un transformador para transferir energía eléctrica de un circuito primario de distribución a un circuito secundario de distribución o circuito de consumo.



PRUEBAS ELÉCTRICAS A TRANSFORMADORES DE DISTRIBUCIÓN

□ PRUEBAS DE RUTINA (100% de unidades)

- Medición de la resistencia de los devanados.
- Medición de la relación de transformación.
- Revisión de la polaridad y grupo de conexión.
- Medición de pérdidas sin carga y corriente de excitación.
- Medición de pérdidas con carga y voltaje de cortocircuito.
- Medición de resistencia de aislamiento puntual (1 minuto).
- Medición de rigidez dieléctrica al aceite.
- Prueba de voltaje inducido (400 Hz).
- Prueba de voltaje aplicado.



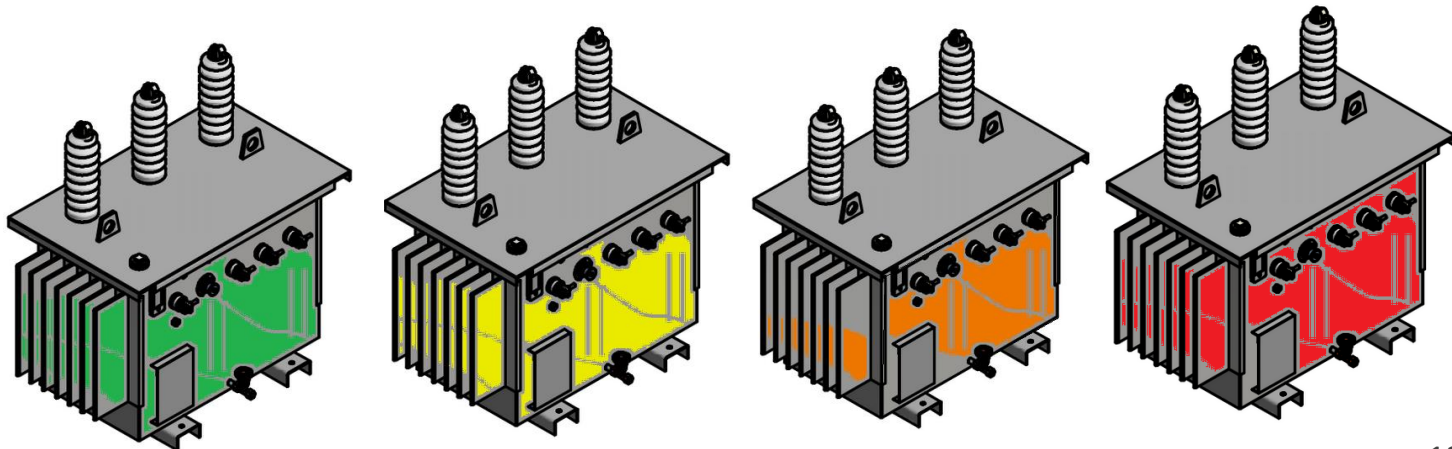
□ PRUEBAS TIPO (prototipos)

- Prueba de cortocircuito dinámico.
- Prueba de impulso (BIL).
- Prueba de calentamiento.

PRUEBA DE CALENTAMIENTO

IEEE C57.12.90-2010.

- Es una prueba para determinar el incremento de temperatura de uno o mas devanados del transformador, medido en los terminales.



MÉTODOS PARA LA PRUEBA DE CALENTAMIENTO

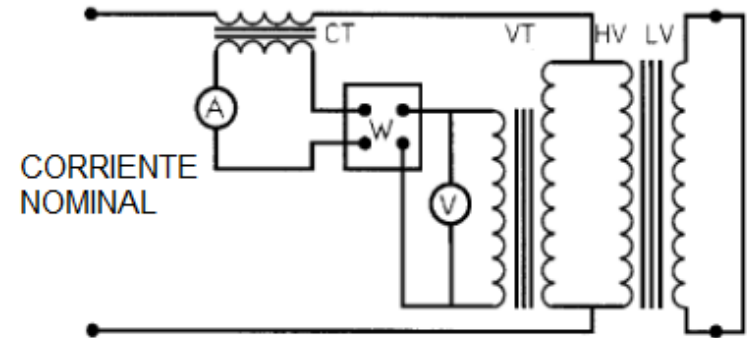
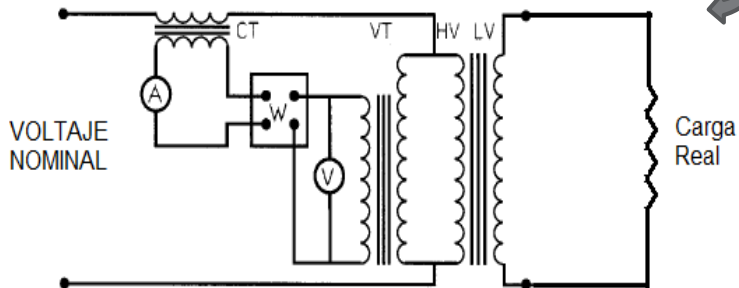
MÉTODOS PARA LA PRUEBA DE CALENTAMIENTO

CARGA SIMULADA

CORTOCIRCUITO

CARGA EN OPOSICIÓN

CARGA REAL



PRUEBA DE CALENTAMIENTO

CONSIDERACIONES GENERALES

El ensayo debe ser realizado en un lugar libre de cambios bruscos de temperatura ambiente.

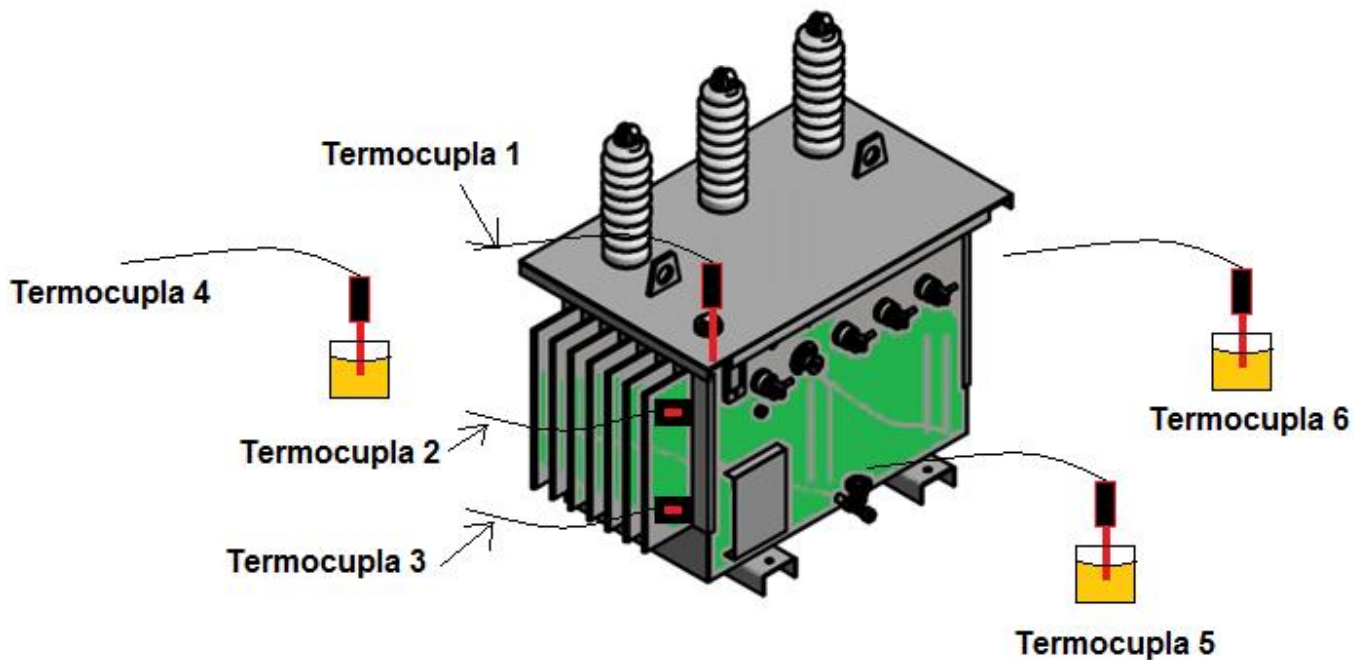
El transformador debe estar completamente ensamblado y lleno de líquido aislante.

Tanto para la medición de resistencia en frío como para la resistencia en caliente, escoger la escala adecuada de corriente en el medidor de resistencia para determinar si es posible medir la resistencia del devanado primario y del devanado secundario con la misma escala, caso contrario se deberá realizar la medida de forma individual para cada bobinado a escala conveniente.

La prueba una vez iniciada, no debe ser interrumpida y se deben tomar las precauciones y medidas de seguridad para evitar accidentes e interrupciones.

PREPARACIÓN DE LA PRUEBA DE CALENTAMIENTO

Antes de iniciar la prueba se debe instalar los sensores de temperatura, estos sensores son termocuplas tipo K, que deben ser instalados de la siguiente manera:

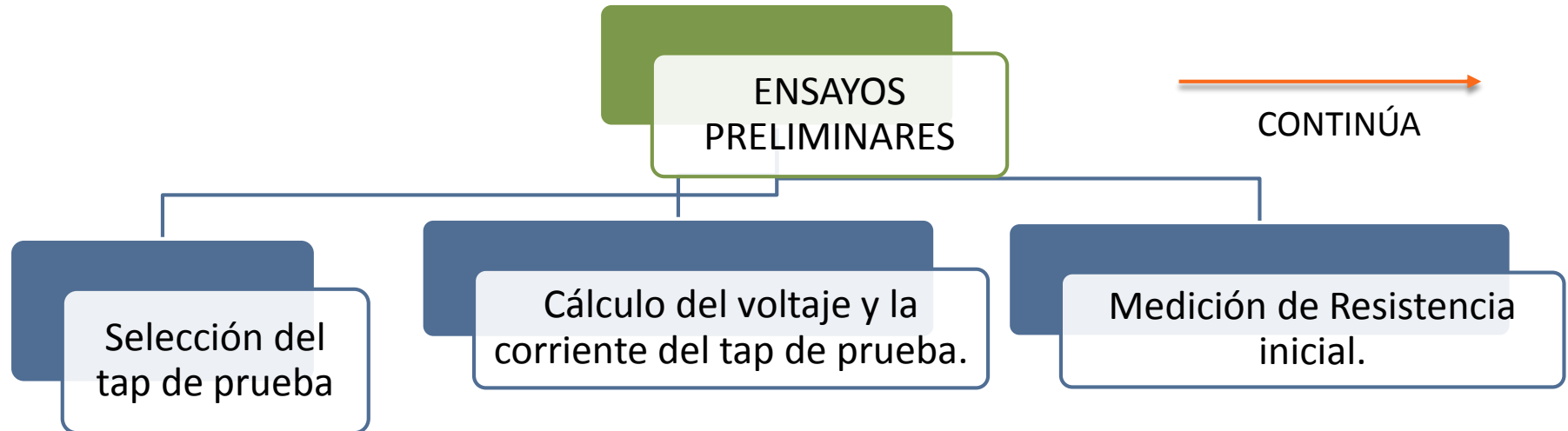


T1: 5cm bajo la superficie del aceite.

T2: $\frac{3}{4}$ de la altura del transformador.

T3: $\frac{1}{4}$ de la altura del transformador.

T4,T5,T6: a 2 o 3m del transformador a la altura media del mismo.



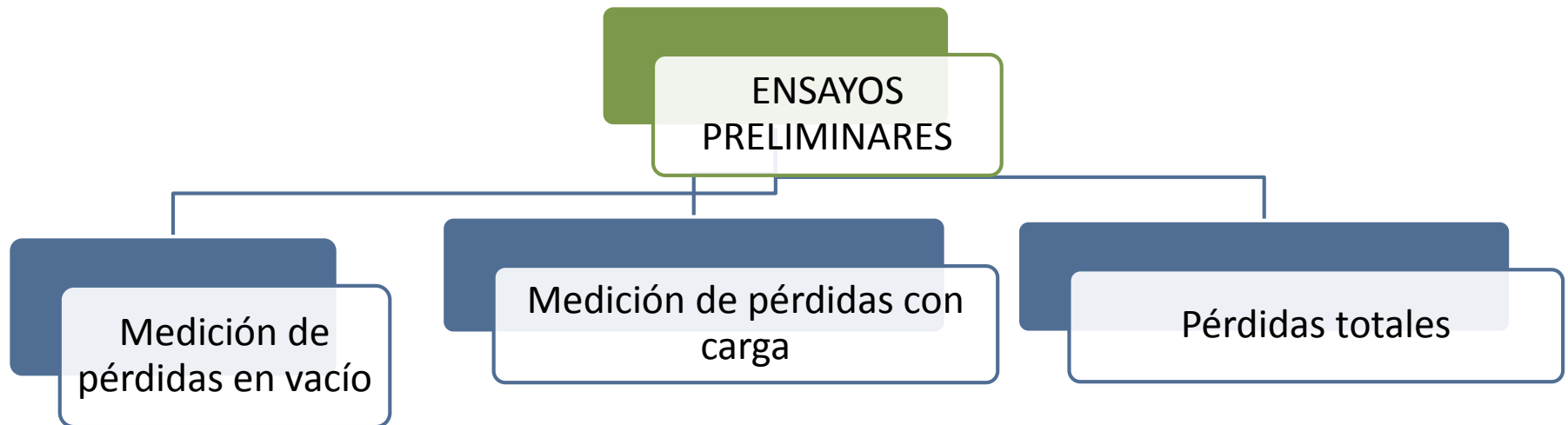
El ensayo debe realizarse en la combinación de conexiones o el tap que de el mayor incremento promedio de temperature. [IEEE C57.12.00-2010] Por lo general esto es en el tap de menor voltaje, y mayor corriente donde se producen las mayores pérdidas.

El voltaje del tap de prueba se obtendrá de la placa de características y la corriente del tap de prueba se obtendrá con la siguiente formula.

$$Inom(3f) tap(n) = \frac{P(VA)}{\sqrt{3} * Voltaje tap(n)}$$

$$Inom(1f) tap(n) = \frac{P(VA)}{Voltaje tap(n)}$$

Para la medición de Resistencia inicial (en frio) debe ser medida antes de la medición de pérdidas, para esto es necesario que el transformador este en equilibrio térmico. Es decir que su temperatura no varíe mas de 1°C en un período de tres horas. Para esto deberá instalarse.



La prueba de pérdidas en vacío se realiza energizando el transformador a voltaje nominal.

En los transformadores de distribución de nuestro estudio se energiza por el lado de menor voltaje.

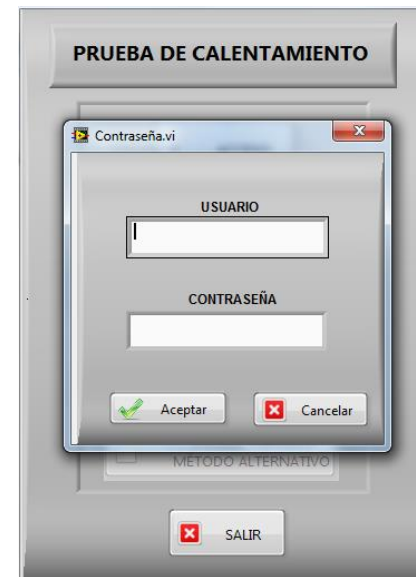
El ensayo debe realizarse con la corriente determinada en el tap que se desea evaluar. Se cortocircuita el lado de menor voltaje y se energiza el transformador por lado de mayor voltaje hasta hacer circular por el devanado la corriente nominal calculada para el mencionado tap

Las pérdidas con carga medidas a temperatura ambiente debe ser reflejada a una temperatura de referencia (85°C) como lo establece la IEEE C57.12.90-2010. (literal 9.4.2). Con el valores de pérdidas reflejadas a 85°C se debe sumar las pérdidas en vacío para determinar el valor de las pérdidas totales.

EJECUCIÓN DE LA PRUEBA DE CALENTAMIENTO

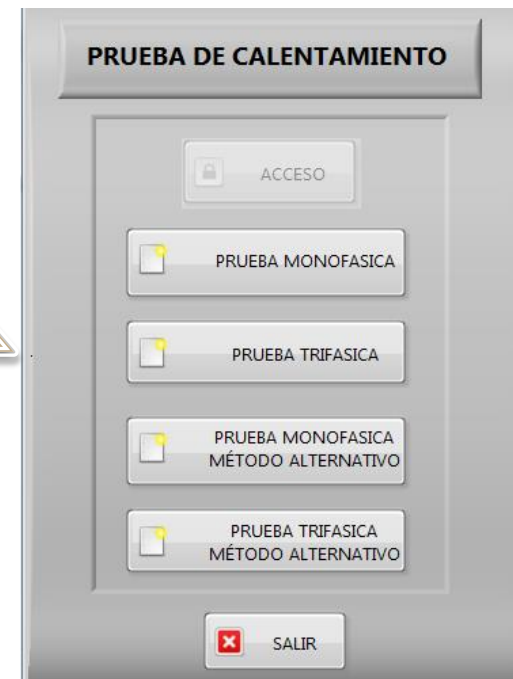
□ INGRESO AL PROGRAMA

- ✓ Para cada usuario se le fue creado un usuario y una contraseña que le permite el ingreso al programa. Con el fin de guardar responsabilidad de la persona que esta ensayando.



➤ SELECCION DEL MODO DE PRUEBA SEGUN EL TRANSFORMADOR

- ✓ El programa ofrece cuatro modalidades de prueba: Monofásico, Trifásico, Prueba monofásica Método alternativo y Prueba trifásica método alternativo.



➤ INGRESO DE DATOS TRANSFORMADOR BAJO PRUEBA:

- El ingreso de la información correcta es importante tanto para la ejecución de la prueba como en la generación del reporte.
- La parametrización obliga a ingresar todos los datos antes de pasar a la siguiente etapa.

DATOS DEL TRANSFORMADOR MONOFÁSICO

Serie: 15570514 Especificación: 50.250 Código: M-5007113
 Año: 2014 Fabricante: ECUATRAN S.A. Clase Enfr: ONAN
 Aislante: Aceite Peso (Kg): 264 Vol. Aisl (L): 60
 Conexión: Aditiva Materia Bobina: Cobre Fecha: 11/11/2014 Probado por: aaa

DATOS INICIALES

Potencia (kVA): 50 V Prim (V): 7620 V Sec (V): 240
 Tap de prueba: 5 V Tap de prueba (V): 7048

ENSAYOS PARA LA PRUEBA DE CALENTAMIENTO

To° de ensayos (°C): 17 Resistencia Prim. (Ohm): 5 Resistencia Sec. (mOhm): 4,8 Po (W): 159
 Pcu a 85°C (W): 510 Io (%): 1,26 Impedancia de CC tap de prueba (%)(85°C): 1,5
 I Prim nom (A): 3,79 I Sec nom (A): 120,28 I de prueba (A): 7,09
 P Total (kW): 0,669 P total (kVAR): 50,00 V cc (V): 105,7

OBSERVACIONES :

DATOS DEL TRANSFORMADOR TRIFÁSICO

Serie: 1557114 Especificación: T-075-M189 Código: T-075080325A
 Año: 2014 Fabricante: ECUATRAN S.A. Clase Enfr: ONAN
 Aislante: Aceite Peso (Kg): 494 Vol. Aisl (L): 150
 Tipo de conexion: Dy Material Bobinas: Cobre Fecha: 11/11/2014 Probado por: aaa

DATOS INICIALES

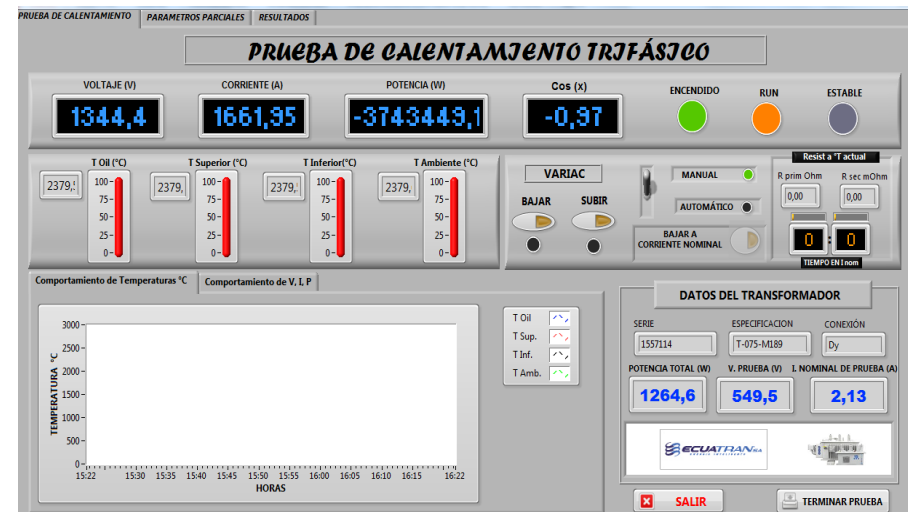
Potencia (kVA): 75 V Prim (V): 22000 V Sec (V): 220
 Tap de prueba: 5 V Tap de prueba (V): 20350 Angulo de Desfase: 150

ENSAYOS PARA LA PRUEBA DE CALENTAMIENTO

To° de ensayos (°C): 17 Resistencia Prim. (Ohm): 79,5 Resistencia Sec. (mOhm): 2,82 Po (W): 258,7
 Pcu a 85°C (W): 1006,5 Io (%): 0,52 Impedancia de CC tap de prueba (%)(85°C): 2,7
 I Prim nom (A): 1,97 I Sec nom (A): 196,82 I de prueba (A): 2,13
 P Total (kW): 1,265 P total (kVAR): 74,99 V cc (V): 549,5

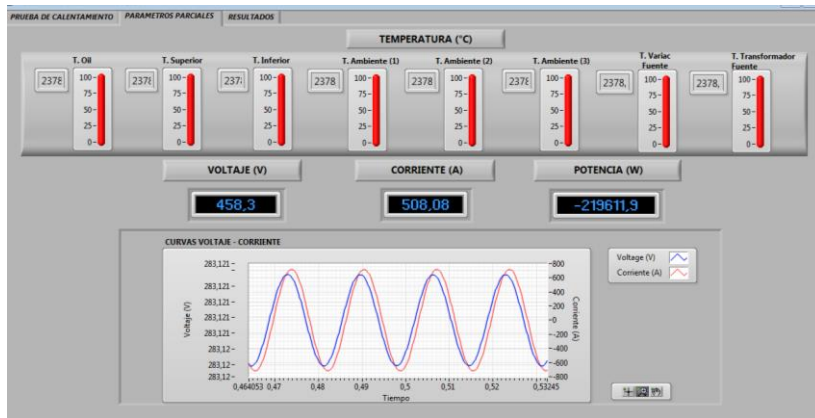
OBSERVACIONES :

- El panel principal muestra de forma resumida pero concreta la información sobre el estado de la prueba, las variables de voltaje, corriente, potencia y temperaturas en tiempo real, además del control de pérdidas de forma manual o automática, un indicador del tiempo en corriente nominal, la Resistencia calculada a la temperatura indicada del aceite y la información del transformador.

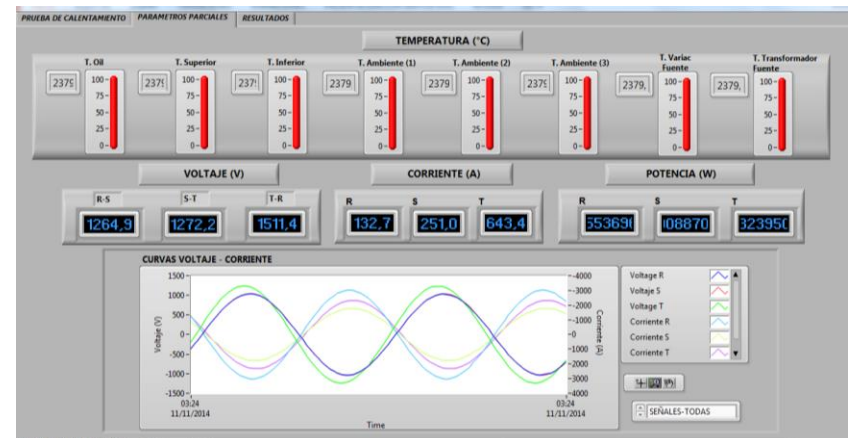


- Dentro de la ventana de adquisición, el software presenta una segunda pestaña que muestra todas las variables medidas.

TRANSFORMADOR MONOFÁSICO



TRANSFORMADOR TRIFÁSICO

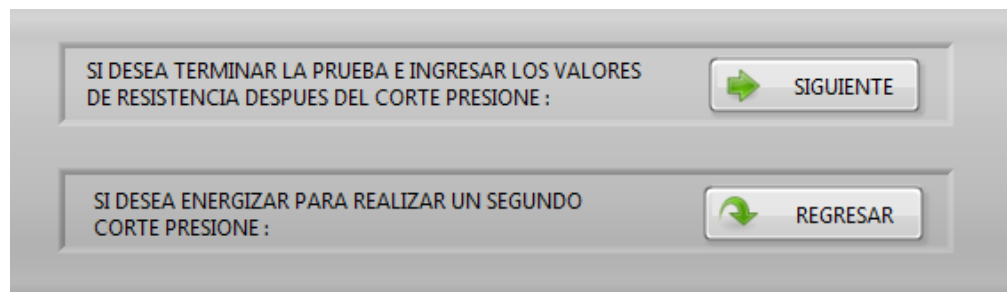


- Dentro de la ventana de adquisición, el software presenta una segunda pestaña que muestra todas las variables medidas.

The screenshot displays a software window titled 'RESULTADOS' (RESULTS) with a tabbed interface. The active tab is 'RESULTADOS', while others include 'PRUEBA DE CALENTAMIENTO' and 'PARAMETROS PARCIALES'. The main area contains a table with the following columns: Fecha, Hora, T Oil (°C), T Sup. (°C), T Inf. (°C), T Amb. (°C), Potencia (W), Corriente (A), and Voltaje (V). The table is currently empty. Below the table, there is a section titled 'DATOS DE ESTABILIZACIÓN' (STABILIZATION DATA) with a row of input fields for the same variables: Fecha, Hora, T Oil (°C), T Sup. (°C), T Inf. (°C), T Amb. (°C), Potencia (W), Corriente (A), and Voltaje (V).

➤ FINALIZACION DE LA ADQUISICIÓN:

- Una vez alcanzada la estabilización de la temperatura del aceite y haber bajado a la corriente nominal durante una hora como especifica la IEEE C57.12.90-2010, se debe asegurar la medición de Resistencia con un equipo exterior. El software tiene la opción para reanudar la adquisición en el caso de que sea necesario energizar nuevamente la unidad para medir otro devanado como también lo establece la IEEE.



➤ INGRESO DE DATOS INICIALES DE LA MEDICION DE RESISTENCIA EN CALIENTE:

- La medición de Resistencia debe realizarse antes de los 4 minutos después de haber sido desenergizado el transformador, y es necesario registrar el tiempo inicial y el intervalo de cada medición.

The screenshot shows a software interface titled "DATOS INICIALES CÁLCULO DE RESISTENCIA A Tf". It is divided into two sections: "DEVANADO PRIMARIO" and "DEVANADO SECUNDARIO". Each section has three input fields: "Tiempo inicial" (split into "Min" and "Seg"), "Intervalo de Tiempo (Seg)", and "Numero Datos". The "Tiempo inicial" fields are set to 1 and 5, the "Intervalo de Tiempo" field is set to 0,25, and the "Numero Datos" field is set to 5. A "CONTINUAR" button with a green arrow is at the bottom.

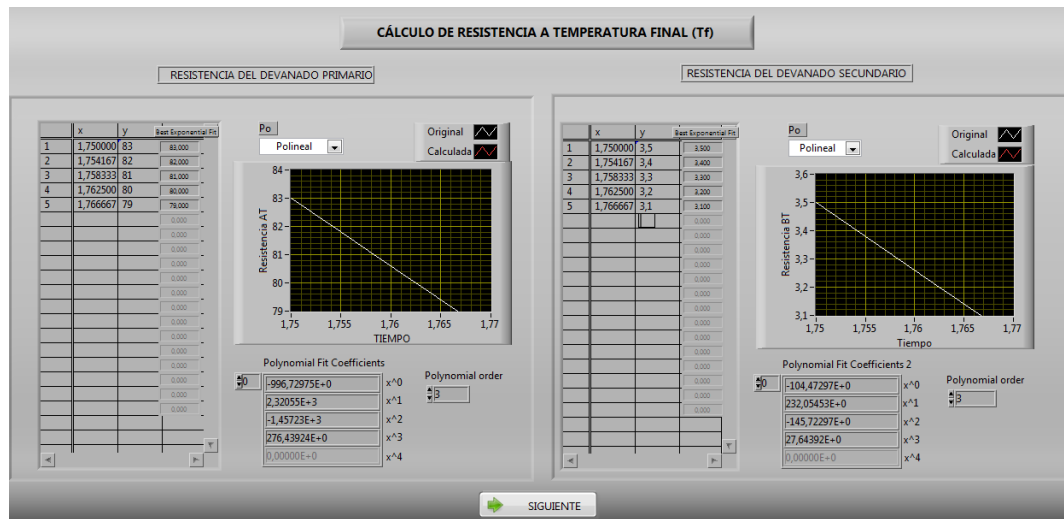
Tiempo inicial		Intervalo de Tiempo (Seg)	Numero Datos
Min	Seg	(Seg)	
1	5	0,25	5

Tiempo inicial		Intervalo de Tiempo (Seg)	Numero Datos
Min	Seg	(Seg)	
1	5	0,25	5

CONTINUAR

➤ INGRESO DE LOS VALORES DE RESISTENCIA:

- Para poder estimar la resistencia en el instante del corte es necesario realizar al menos 20 mediciones para determinar la tendencia de la curva de enfriamiento.



➤ CÁLCULO Y GENERACIÓN DEL REPORTE:

- La facilidad que brinda el software es el cálculo de los incrementos de temperature tanto a 3000 msnm que es la altura a la que se ensaya, como los valores corregidos a 1000 msnm. Además genera de forma instantánea el reporte del ensayo en formato Excel.

TRANSFORMADOR MONOFÁSICO

RESULTADOS FINALES DEL ENSAYO TÉRMICO MONOFÁSICO

TEMPERATURA A ESTABILIZACIÓN (°C)				TEMPERATURA AL CORTE (°C)				RESISTENCIA A TEMPERATURA INICIAL		RESISTENCIA A TEMPERATURA FINAL	
T oil (°C)	T sup (°C)	T inf (°C)	T amb (°C)	T oil (°C)	T sup (°C)	T inf (°C)	T amb (°C)	PRIMARIO (Ohm)	SECUNDARIO (mOhm)	PRIMARIO (Ohm)	SECUNDARIO (mOhm)
0,0	0,0	0,0	0,0	2378,	2378,	2378,	2378,	5,00	4,80	9,96	9,76

DIMENSIONES DEL TANQUE		ALTURA DE ENSAYO :		VALORES CORREGIDOS A :	
DIÁMETRO (mm)	510	3000	msnm	1000	msnm
ALTO (mm)	1300	Elevación de temperatura del aceite (°C):	0,0	0,0	
RADIADORES		Temperatura promedio del aceite (°C):	0,0	0,0	
ALTO (mm)	NA	Temperatura promedio del devanado primario (°C):	0,0	0,0	
ANCHO (mm)	NA	Temperatura promedio del devanado secundario (°C):	0,0	0,0	
CANTIDAD	NA	Elevación de temperatura promedio del devanado primario (°C):	0,0	0,0	
		Elevación de temperatura promedio del devanado secundario (°C):	0,0	0,0	

CALCULAR **GUARDAR REPORTE**

TRANSFORMADOR TRIFÁSICO

RESULTADOS FINALES DEL ENSAYO TÉRMICO TRIFÁSICO

TEMPERATURAS DE ESTABILIZACIÓN				TEMPERATURAS EN EL CORTE (°C)				RESISTENCIA A TEMPERATURA INICIAL		RESISTENCIA A TEMPERATURA FINAL	
T oil (°C)	T sup (°C)	T inf (°C)	T amb (°C)	T oil (°C)	T sup (°C)	T inf (°C)	T amb (°C)	PRIMARIO (Ohm)	SECUNDARIO (mOhm)	PRIMARIO (Ohm)	SECUNDARIO (mOhm)
0,0	0,0	0,0	0,0	2379,	2379,	2379,	2379,	79,50	2,83	143,03	9,50

DIMENSIONES DEL TANQUE		ALTURA DE ENSAYO :		VALORES CORREGIDOS A :	
LARGO (mm)	1070	3000	msnm	1000	msnm
ALTO (mm)	690	Elevación de temperatura del aceite (°C):	0,0	0,0	
ANCHO (mm)	570	Temperatura promedio del aceite (°C):	0,0	0,0	
RADIADORES		Temperatura promedio del devanado primario (°C):	0,0	0,0	
ALTO (mm)	1000	Temperatura promedio del devanado secundario (°C):	0,0	0,0	
ANCHO (mm)	100	Elevación de temperatura promedio del devanado primario (°C):	0,0	0,0	
CANTIDAD	22	Elevación de temperatura promedio del devanado secundario (°C):	0,0	0,0	

CALCULAR **GUARDAR REPORTE**

➤ REPORTE DEL ENSAYO DE CALENTAMIENTO:

- El reporte generado tiene formato Excel y es acorde al documento del Sistema de Gestión de Calidad de la empresa.



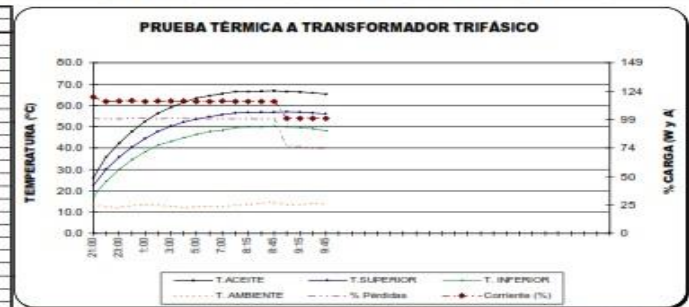
EC-RG-CC-LA-35-02

Código:	M-2507113
Serie:	000000014
Especificación:	25 P1

Año	2014
ensayo a msnm	3000
Norma:	04

Po (W):	90.2	Io (%):	0.01	Pcu 85°(W):	265.6	Z 85° (%):	2.57
Ti (°C):	16	Ro P(mOhm):	9.706	Rf P(mOhm):	12.050	Tf BP(°C):	76.70
PT (85°C):	372.9	Ro B(mOhm):	9.224	Rf B(mOhm):	11.433	Tf BS(°C):	75.96

HORA	TEMPERATURA				VOLTAJE		CORRIENTE		POTENCIA		INCREMENTO		CORRIENTE		P. TOTALES	
	ACDTE	T.SUPERIOR	T.INFERIOR	AMBIENTE	A.T.	B.T.	A.T. (A)	W	TEMP. LIG.	TEMP.	%	%	%	%	%	%
21:00	26.0	22.4	17.2	14.0	230.00	CC	4.04	374.0	9.40	0.0	119.2	100.29				
22:00	35.7	29.9	24.4	12.3	225.10	CC	3.90	373.0	20.05	11.3	115.0	100.03				
23:00	42.4	35.7	29.9	12.2	226.00	CC	3.92	373.4	27.30	6.7	115.6	100.13				
0:00	47.5	40.4	34.6	13.2	226.10	CC	3.93	374.0	31.70	4.4	115.9	100.29				
1:00	52.5	44.5	38.2	13.3	226.00	CC	3.90	374.0	36.05	4.4	115.0	100.29				
2:00	56.3	47.7	41.4	13.2	226.03	CC	3.92	373.3	39.95	3.9	115.5	100.11				
3:00	59.2	50.2	43.1	12.8	226.03	CC	3.92	374.0	42.05	2.9	115.5	100.29				
4:00	61.5	52.1	44.9	12.2	225.60	CC	3.92	374.0	45.70	2.6	115.5	100.29				
5:00	63.3	53.6	46.4	12.6	225.17	CC	3.91	373.0	47.15	1.4	115.3	100.03				
6:00	64.6	54.7	47.8	12.7	224.73	CC	3.90	373.3	48.45	1.3	115.0	100.11				
7:00	65.6	55.7	48.4	12.6	224.30	CC	3.92	373.7	49.15	0.7	115.6	100.21				
8:00	66.4	56.4	49.6	13.2	223.87	CC	3.91	372.9	49.80	0.7	115.3	100.00				
8:15	66.5	56.6	49.9	13.3	223.43	CC	3.90	372.9	49.85	0.0	115.0	100.00				
8:30	66.6	56.8	49.9	14.3	223.00	CC	3.90	372.9	49.85	-1.0	115.0	100.00				
8:45	66.8	56.9	50.2	14.4	222.00	CC	3.90	373.0	49.05	0.2	115.0	100.03				
9:00	66.5	57.0	49.6	13.3	192.90	CC	3.40	262.0	49.60	0.5	100.3	75.62				
9:15	66.2	56.5	49.6	13.6	193.50	CC	3.40	262.0	49.00	-0.6	100.3	75.62				
9:30	65.0	56.5	49.1	14.0	192.90	CC	3.40	276.0	46.10	-0.9	100.3	74.55				
9:45	65.4	56.0	46.1	13.7	192.30	CC	3.40	276.0	47.75	-0.3	100.3	74.55				

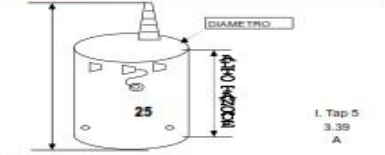


VALORES FINALES (°C)			CRITERIOS DE ACEPTACION	
ETPsE	52.40	48.52	Critero	IEEE C.57.12.00 La elevación de temperatura promedio del devanado sobre la temperatura ambiente no exceda los 65°C a la potencia nominal
TPsE	63.50	58.80		
TPDP	76.70	71.92		
TPDS	75.96	70.36		
ETDP	64.29	59.45		NTE INEN 2126.- incremento devanado 65°C, incremento en aceite 50°C
ETDS	63.48	58.78	OK	

DIMENSIONES DE TANQUE:	
DIAMETRO	360 mm
ALTO	660 mm

RADIADORES		
ANCHO (mm):	ALTO (mm):	CANTIDAD
N/A	N/A	N/A

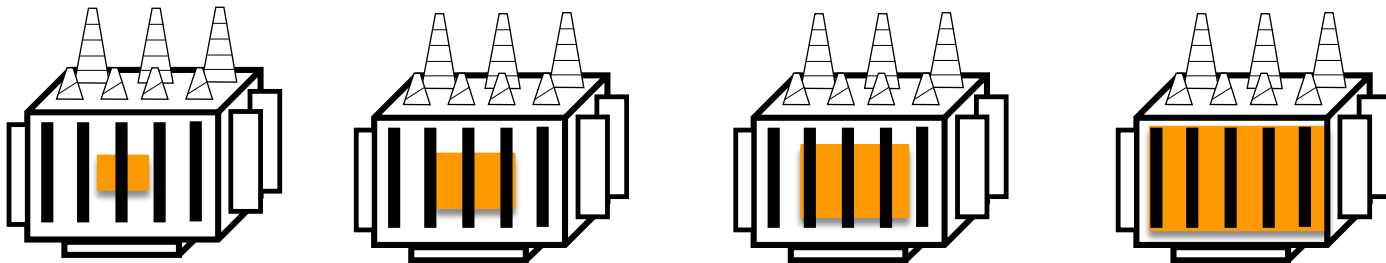
VALORES NOMINALES	
POTENCIA	25 KVA
A.T. - Bobinas	VOLTIOS 7970 AMPERIOS 1.011
B.T. - Bobinas	VOLTIOS 240 AMPERIOS 60.14



ETPsE - ELEVACION DE TEMPERATURA DEL ACEITE	ETPsI - TEMPERATURA PROMEDIO DEL ACEITE	ETDP - TEMPERATURA PROMEDIO DEL DEVANADO PRIMARIO	ETDP - TEMPERATURA PROMEDIO DEL DEVANADO SECUNDARIO
TPDS - TEMPERATURA PROMEDIO DEL DEVANADO SECUNDARIO	ETDP - ELEVACION DE TEMPERATURA DEL DEVANADO PRIMARIO	ETDP - ELEVACION DE TEMPERATURA DEL DEVANADO SECUNDARIO	ETDP - ELEVACION DE TEMPERATURA DEL DEVANADO SECUNDARIO
MÉTODO CARGA CORTOCIRCUITO PASA LA PRUEBA	TAP 5	TIEMPO DE PRUEBA 14:00 HORAS	% CARGA PROMEDIO ACEITE (L) 45
OBSERVACIONES:		PESO T. (Kg) 0	

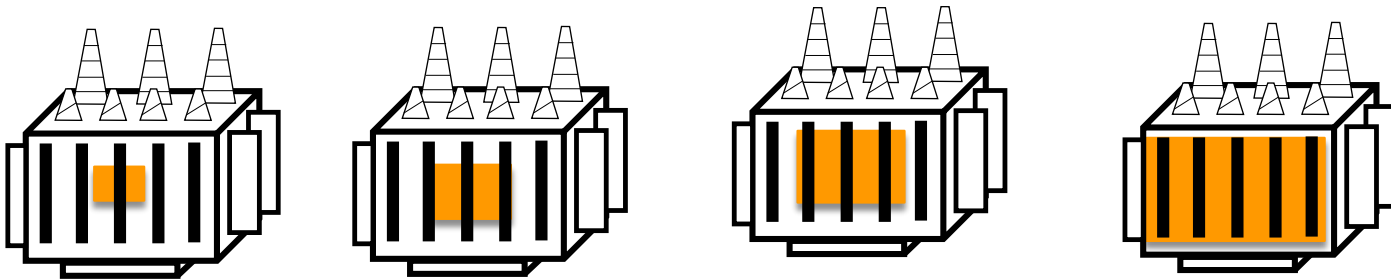
MÉTODO ALTERNATIVO PARA LA EJECUCIÓN DE LA PRUEBA DE CALENTAMIENTO

- Las ecuaciones que describen el comportamiento térmico del transformador son descritas en la IEEE C57.91-1995. En base a esto se ha experimentado con transformadores monofásicos de 15KVA, 25KVA y 50KVA y con transformadores trifásicos de 30KVA, 75KVA y 150KVA determinado su comportamiento térmico.



➤ MÉTODO ALTERNATIVO ESTUDIADO:

- El objetivo de buscar un método alternativo para la realización de la prueba de calentamiento es disminuir el tiempo, ya que uno de los mayores limitantes que presenta la realización de la prueba es el tiempo de estabilización del aceite.



➤ MÉTODO ALTERNATIVO ESTUDIADO:

- El método aplicado para reducir el tiempo de ejecución de la prueba es el método de sobrecargas iniciales.
- Para poder aplicar el método de sobrecargas iniciales es necesario tomar en cuenta la afectación que sufre el transformador en su vida útil debido a las sobrecargas.
- El calculo de la perdida de vida en los transformadores ensayados se realiza basándose en las ecuaciones del comportamiento térmico dadas por la IEEE C 57.91-1995.
- La ecuación que describe el comportamiento térmico del top oil es la siguiente:

$$\Delta\Theta_{TO} = (\Delta\Theta_{TO,U} - \Delta\Theta_{TO,i}) \left(1 - \exp^{-\frac{t}{TTO}}\right) + \Delta\Theta_{TO,i} \exp^{-\frac{1}{3.5}}$$

■ **Donde:**

- $\Delta\Theta_{TO,U}$: Incremento de temperatura del top oil final del tiempo de estabilización de las temperaturas de una carga.
- $\Delta\Theta_{TO,i}$: Incremento de temperatura del top oil al inicio de una carga.
- t: Instantes de tiempo para el cual se va a evaluar, en horas.
- TTO: Constante de tiempo del aceite para una carga dada y para una diferencia de temperatura específica en el aceite entre el inicio y final de la carga.

$$\Delta\Theta_H = \Delta\Theta_{H,R} * K^{2m}$$

□ **Donde:**

- $\Delta\theta_{H,R}$: Incremento de temperatura del punto más caliente con respecto al top oil, a carga nominal, °C.
- m : Potencia de la elevación de temperatura en el punto más caliente contra las pérdidas. Es 0,8 para transformadores con clase de refrigeración ONAN, ONAF, OFAF y OFWF. Es 1,0 para ODAF y ODWF.

➤ PÉRDIDA DE VIDA DEBIDO A LAS SOBRECARGAS INICIALES:

- Con la estimación de la temperatura alcanzada por el punto mas caliente en la parte activa se determina el factor de aceleración del envejecimiento con la siguiente ecuación:

$$FAE = e^{\left[\frac{15000}{383} - \frac{15000}{273 + \theta_H} \right]}$$

Donde:

- ***FAE***: Factor de aceleración del envejecimiento.
- **θ_H** : Temperatura del punto más caliente.

- Si existen mas de una sobrecarga en el periodo estudiado, debe ser determinado un envejecimiento equivalente de todas la sobrecargas por medio de la siguiente ecuación:

$$EE = \frac{\sum_{i=1}^N FAE_i * \Delta t_i}{\sum_{i=1}^N \Delta t_i}$$

Donde:

- **EE**: Envejecimiento equivalente o total para un período de tiempo.
- **i**: Índice de los intervalos de tiempo t.
- **N**: Número total de intervalos de tiempo.
- **Δt_i** : Intervalo de tiempo en horas.
- **FAE_i** : E_i : Factor de aceleración del envejecimiento, durante el intervalo t_i .

- Finalmente para determinar el porcentaje de pérdida de vida provocada en el transformador debido a las sobrecargas iniciales se utiliza la siguiente ecuación:

$$\%Pérdida de vida = \frac{EE*t*100}{Vida normal de aislamiento}$$

Donde:

- EE:** Envejecimiento equivalente o total para un período de tiempo.
- t:** Intervalos de tiempo t (h).
- Vida normal del aislamiento:** La vida normal del aislamiento está dado por la tabla siguiente.

- **Tabla 1.** Vida normal del aislamiento para un sistema libre de oxígeno y humedad con temperatura máxima del punto caliente de 110°C.

Basis	Normal insulation life	
	Hours	Years
50% retained tensile strength of insulation (former IEEE Std C57.92-1981 criterion)	65000	7,42
25% retained tensile strength of insulation	135000	15,41
200 retained degree of polymerization in insulation	150000	17,12
Interpretation of distribution Transformer functional life test data (Former IEEE Std C57.91-1981 criterion)	180000	20,55

NOTES:

1- Tensile strength or degree of polymerization (D.P.) retention values were determined by sealed tube aging on well-dried insulation samples in oxygen - free oil.

2- Refer to I.2 in annex I for discussion of effect of higher values of water and oxygen and also for the discussion on the given above.

➤ METODO ALTERNATIVO ESTUDIADO:

- En base a los ensayos realizados el plan de sobrecargas para realizar la prueba de calentamiento es la siguiente:
 - Sobrecargar a $K=1,4$ de la carga nominal durante 1,25h.
 - Sobrecargar a $K=1,1$ de la carga nominal durante 1,2h.
 - Sobrecargar a $K=1,4$ de la carga nominal durante 1h.
 - Sobrecargar a $K=1,2$ de la carga nominal durante 1h.

- En los transformadores que se realizaron los ensayos de calentamiento bajo el método alternativo han sufrido una disminución en su vida útil teórica estimada (Tabla 2.) que es muy despreciable considerando que se trata de una sobrecarga controlada, y además que la afectación es hecha a un transformador por cada especificación, por el contrario se ha disminuido el tiempo de realización de la prueba (Tabla 3.).

Tabla 2. Pérdida de vida en transformadores ensayados.

TRANSFORMADOR	% De pérdida de vida
Transformador monofásico 25KVA. 13800GRDY7970/120-240	0,47
Transformador monofásico 37.5KVA. 13800GRDY7970/120-240	0,43
Transformador trifásico 75KVA. 13800V/220V	0,08
Transformador trifásico 112KVA. 6000V/220V	0,019

Tabla 3. Tiempo de ejecución de la prueba de calentamiento por el método alternativo usando el equipo desarrollado.

	Tiempo prueba de calentamiento bajo el método IEEEE (Horas)	Tiempo prueba de calentamiento bajo el método alternativo. (Horas)	Disminución de tiempo. (Horas)	Disminución de tiempo. (%)
Transformador monofásico 25KVA. 3800GRDY7970/120-240	12	9	3	25
Transformador monofásico 37.5KVA. 13800GRDY7970/120-240	12	9	3	25
Transformador trifásico 75KVA. 13800V/220V	13	10	3	23
Transformador trifásico 112KVA. 6000V/220V	12,5	10,5	2	16

□ CONCLUSIONES

- Se diseñó y desarrolló el equipo y el software para automatizar el ensayo de calentamiento a transformadores de distribución sumergidos en aceite, bajo el método que establece la norma IEEE C57.12.90-2010, disminuyendo los tiempos de estabilización del aceite hasta un 20%.
- El sistema desarrollado controla las variables de voltaje, corriente y potencia activa a la cual debe ser energizado en el transformador bajo prueba, además el criterio de estabilización es calculado automáticamente, y emite una señal luminosa y sonora que advierte al operador que la estabilización en el aceite fue alcanzada.

- El software diseñado para el ensayo de calentamiento tiene una interface versátil de fácil acceso e interpretación, facilitando a los operadores en este caso los laboratoristas de la empresa Ecuatran S.A. la realización del mismo.
- Con la utilización del software y el equipo desarrollados, la empresa Ecuatran puede ofrecer mayor veracidad en los resultado obtenidos a los clientes que solicitan el ensayo de calentamiento y deciden asistir a las prueba en fábrica, ya que se emite en un formato establecido los resultados en forma inmediata una vez concluido el ensayo, eliminando la incertidumbre de la persona que digitaba los datos en un computador.
- Con la implementación del equipo y el software diseñados se disminuyó el tiempo de ejecución de la prueba hasta un promedio del 26%, comparado con el tiempo que tomaba hacer la prueba de forma manual.

- El sistema desarrollado no depende de operarios para el registro de datos y el control de variables de voltaje, corriente y potencia, disminuyendo la realización de horas extras que en algunos casos se debían hacer hasta alcanzar el criterio de estabilización, necesitando únicamente la presencia de operarios al inicio y al final del ensayo.
- La utilización del método alternativo permite reducir el tiempo de ejecución de la prueba hasta en un promedio del 22% comparado con el tiempo que se tarda realizar el ensayo bajo el procedimiento de la IEEE C57.12.90-2010 utilizando el sistema desarrollado.
- La pérdida de vida provocada al usar el método alternativo es un promedio de 0,45% equivalente a 34 días en transformadores monofásicos, y de un promedio de 0,25% equivalente a 19 días en transformadores trifásicos.

□ RECOMENDACIONES

- El método alternativo debe ser considerado únicamente en el caso de que sea necesario acortar el tiempo de ejecución de la prueba de manera urgente, con la constante consecuencia de la pérdida de vida.
- Asegurar que el ambiente donde se realiza la prueba de calentamiento, este libre de cambios bruscos de temperatura.
- Las termocuplas encargadas de medir la temperatura ambiente debe estar sumergidas en aceite para evitar errores en la medición y en el criterio de estabilización por brisa o corrientes de aire.

□ REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- IEEE Std C57.12.90™-2010, Test Code for Liquid-Immersed Distribution, Power, and Regulating Transformers.
- IEEE Std C57.12.00-2010 IEEE Standard for General Requirements for Liquid-Immersed Distribution, Power, and Regulating Transformers.
- ESTUDIO DE SOBRECARGAS BASADO EN LAS NORMAS ANSI/IEEE C57.91-1995; Tadeo Czerweny S.A.
- National Instruments, [En línea]. Available: www.ni.com. [Último acceso: 23 1 2014].



GRACIAS