

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR

FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA

ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA



**ANÁLISIS Y REDISEÑO DE UN INSTRUMENTO VIRTUAL
PARA TRAZAR LA CURVA TÉRMICA EN
TRANSFORMADORES DE POTENCIA**

PRESENTADO POR:

VINICIO ALEJANDRO CIENFUEGOS PACAS

JOSÉ ANTONIO GONZÁLEZ PREZA

PARA OPTAR AL TÍTULO DE:

INGENIERO ELECTRICISTA

CIUDAD UNIVERSITARIA, MAYO DE 2022

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR

RECTOR:

MSC. ROGER ARMANDO ARIAS ALVARADO

SECRETARIO GENERAL:

ING. FRANCISCO ANTONIO ALARCÓN SANDOVAL

FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA

DECANO:

DR. EDGAR ARMANDO PEÑA FIGUEROA

SECRETARIO:

ING. JULIO ALBERTO PORTILLO

ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

DIRECTOR:

ING. ARMANDO MARTÍNEZ CALDERÓN

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

Trabajo de Graduación previo a la opción al Grado de:

INGENIERO ELECTRICISTA

Título:

**ANÁLISIS Y REDISEÑO DE UN INSTRUMENTO VIRTUAL
PARA TRAZAR LA CURVA TÉRMICA EN
TRANSFORMADORES DE POTENCIA**

Presentado por:

VINICIO ALEJANDRO CIENFUEGOS PACAS

JOSÉ ANTONIO GONZÁLEZ PREZA

Trabajo de Graduación Aprobado por:

Docente Asesor:

DR. CARLOS OSMIN POCASANGRE JIMÉNEZ

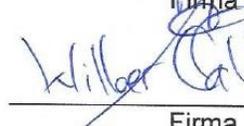
NOTA Y DEFENSA FINAL

En esta fecha, Lunes 7 de marzo de 2022, en la Sala de Lectura de la Escuela de Ingeniería Eléctrica, a las 5:30 p.m. horas, en presencia de las siguientes autoridades de la Escuela de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de El Salvador:

1. Ing. Armando Martínez Calderón
Director

2. MSc. José Wilber Calderón Urrutia
Secretario


Firma


Firma

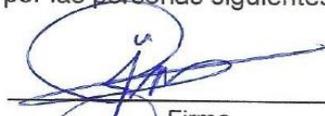


Y, con el Honorable Jurado de Evaluación integrado por las personas siguientes:

- DR. CARLOS OSMIN POCASANGRE JIMÉNEZ
(Docente Asesor)

- ING. ARMANDO MARTINEZ CALDERON

- MSC. LUIS ROBERTO CHEVEZ PAZ


Firma


Firma


Firma

Se efectuó la defensa final reglamentaria del Trabajo de Graduación:

ANÁLISIS Y REDISEÑO DE UN INSTRUMENTO VIRTUAL PARA TRAZAR LA CURVA
TÉRMICA EN TRANSFORMADORES DE POTENCIA

A cargo de los Bachilleres:

- CIENFUEGOS PACAS VINICIO ALEJANDRO

- GONZÁLEZ PREZA JOSÉ ANTONIO

Habiendo obtenido en el presente Trabajo una nota promedio de la defensa final:
(Ocho punto nueve)

8.9

AGRADECIMIENTOS

JOSÉ ANTONIO GONZÁLEZ PREZA

A Dios todo poderoso que me dio el temple y la sabiduría para poder afrontar todos los retos de la vida hasta el día de hoy.

A mi madre Rosa Lidia, educarme y guiarme en el camino del bien, por ser mi ejemplo a seguir y alentarme a no dejar mi camino como profesional, por su amor incondicional, por su sacrificio por la familia, infinitas gracias mama, te amo. Este triunfo te lo dedico a ti.

A mi Padre Jose Antonio, por formarme carácter y por ayudarme a ser quien soy ahora, por su apoyo invaluable a lo largo de mi vida.

A mis hermanos David Enrique y Lidia María, por darme su apoyo personal y ayudarme a lo largo de toda mi vida y en todos los ámbitos de la misma.

A mi Prometida Alejandra, por ser mi soporte en todo momento, en los momentos malos y buenos, por siempre darme aliento para seguir el camino.

A "Niña Mari" y "Don Raúl", por acogerme como uno más de sus hijos y darme un segundo hogar al cual poder llegar después de días complicados.

A mis amigos, Julito, Marvin, Edgardo, Job, Marco, Luisito, Rodrigo, Fidel, Merino, Wilmer, en especial a mi compañero de tesis Vinicio por su apoyo y trabajo en equipo. Y también otros que de alguna u otra manera han estado presentes en mi vida personal y universitaria.

A nuestro docente Ing. Armando Calderón por su ayuda y sus enseñanzas en el aula de clases.

A Reyna Vides "niña Reynita" Por sus consejos y su invaluable apoyo dentro de la universidad, sin ella el proceso sería más difícil, muchas gracias. Siempre será un pilar fundamental en la EIE.

AGRADECIMIENTOS

VINICIO ALEJANDRO CIENFUEGOS PACAS

En primer lugar, agradecer a Dios, y Madre María, por las bendiciones, la fortaleza, fe y acompañarnos, para afrontar todos los momentos difíciles de la vida y disfrutar de los buenos.

A mi madre, Marilenis Pacas quien ha sido mi mayor ejemplo a seguir, una mentora inigualable a lo largo de mis estudios y en especial en la vida; inculcarme las cosas que me ha formado como la persona que soy. Darme el soporte incondicional y apoyarme en cada decisión que he tomado sin nunca rendirse en su fe conmigo. Madre este logro es por, para y gracias a ti, te lo dedico. Te amo madre.

A mi abuela “Niña Paca”, por apoyarme desde pequeño y cuidarme en todo momento que su bendición diaria antes de irme a mis estudios me dio el impulso para este logro.

A mi padre, José Roberto Cienfuegos, mi abuelo “Papa peto”, y abuela “Mamá Tita” (QEPD), por formarme con carácter y enseñarme en la toma en las decisiones y confiar en Dios.

A toda mi familia cercana y lejana que han depositado una enseñanza en cada palabra, consejo y apoyo que me han brindado a lo largo de mi vida. Y ayudarme en los momentos difíciles.

A mis amigos de universidad Julito, Ricardo, Ronald, Miguel, Ronny, William, Meme, Roberto, Andrés y demás compañeros, con los cuales nos hemos debatido las diferentes asignaturas.

A mis amigos de suiza shore, mi mejor amiga, amigos, y demás amigos cercanos con quienes he compartido esta etapa y me han apoyado e instado a completar este logro.

A los docentes de la FIA, EIE y colaboradores Posada y Juancito, quienes nos ha transmitido sus conocimientos y experiencias para formarnos como profesionales. En conjunto con nuestros docentes asesores Ing. Armando Calderón y Dr. Carlos Pocasangre, por consejeros, maestros y pacientes investigadores para la elaboración de este trabajo.

A “Niña Reinita” y quien siempre ha tenido un consejo para animarnos en el camino académico, y ayudarnos en todos los procesos que seguimos en la U.

Finalmente, a mi compañero de tesis José Preza, con quien hemos compartimos nuestros estudios, hasta parte de la vida, cuyo ánimo, apoyo y compañerismo han sido pilar para finalizar la elaboración de esta investigación.

TABLA DE CONTENIDO

LISTA DE ILUSTRACIONES.....	6
LISTA DE TABLAS	8
GLOSARIO	9
OBJETIVOS	10
ANTECEDENTES	11
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	11
JUSTIFICACIÓN	11
INTRODUCCIÓN	12
I. EFECTOS DE LA DISTORSIÓN ARMÓNICA EN LA OPERACIÓN DE TRANSFORMADORES	13
1.1 Efectos de los armónicos.....	15
II. ANÁLISIS MATEMÁTICO PARA EL CALCULO DE PERDIDAS NO LINEALES EN TRANSFORMADORES	17
2.1 Procedimientos recomendados para evaluar la capacidad de carga de los transformadores utilizando las pérdidas por corrientes de Eddy.....	19
2.2 Cálculos y modificaciones adicionales para transformadores inmersos en líquido.....	20
2.3 Ejemplo de cálculo del punto más caliente arriba de la temperatura ambiente.....	22
III. CALCULO DEL EQUIVALENTE DE CAPACIDAD DEL TRANSFORMADOR USANDO DATOS DISPONIBLES DE INFORME CERTIFICADO DE PRUEBA.....	26
3.1 Ejemplo práctico para Cálculos típicos para transformadores sumergidos en líquido usando datos disponibles de informe de prueba certificado.....	28
IV. INTRODUCCIÓN AL DESARROLLO DE INSTRUMENTO VIRTUAL PARA TRAZAR LA CURVA TÉRMICA DE CALOR.....	33
4.1 Generalidades del desarrollo de aplicaciones.....	33
4.2 Metodología del diseño de la herramienta.....	34
4.2.1 Desarrollo rápido de aplicaciones (RAD).....	34
4.2.2 Pasos del desarrollo rápido de aplicaciones.....	34
4.3 Implementación del método desarrollo rápido de aplicaciones (RAD) para de instrumento virtual para trazar la curva térmica en transformadores de potencia.....	35
4.3.1 Definición de los requisitos del proyecto.....	35

4.3.2	Herramientas de medición necesarias para el instrumento virtual.	37
4.3.3	Analizador de redes eléctricas.	37
4.3.4	Hoja de pruebas bajo IEEE C57.12.00-2015.....	39
4.4	Creación de prototipos.....	41
4.4.1	Selección de lenguaje de programación.	42
4.4.2	Prototipo inicial del instrumento programado en Python.	43
4.5	Creación, pruebas e incorporación de comentarios.	44
4.6	Finalización e implementación de thermal curve (instrumento virtual).	44
4.6.1	Flujograma del algoritmo de la herramienta virtual thermal curve.	45
4.6.2	Clases y funciones primordiales de thermal curve de thermal curve.	48
V.	GUÍA DE USO DE INSTRUMENTO VIRTUAL THERMAL CURVE.....	50
5.1	Obtención de parámetros eléctricos.....	50
5.2	Resultado final de la herramienta thermal curve.	54
5.3	Características de la herramienta thermal curve.....	54
5.3.1	Requerimientos mínimos de la computadora.	54
5.3.2	Componentes de thermal curve.	55
VI.	PRUEBAS REALIZADAS Y RESULTADOS OBTENIDOS CON EL INSTRUMENTO VIRTUAL THERMAL CURVE.....	58
6.1	Parámetros eléctricos de sujetos de prueba.	58
6.2	Sujeto de prueba 1 HANES –TIPO PADMOUNTED 1000KVA [14].....	58
6.2.1	Rango de tensión en LV, para el transformador, tomada desde reporte de pruebas con base a CIRCUTOR. [14].....	59
6.2.2	Perfil de corrientes de carga en la subestación, de acuerdo a datos del analizador y el programa CIRCUTOR. [14].	60
6.2.3	Para los datos de potencia activa se tiene las siguientes variaciones de la potencia: [14].....	60
6.2.4	<i>Datos son proporcionados por el test y las hojas del fabricante utilizadas en prueba:</i> [14].....	62
6.2.5	Resultado de estimación de la curva térmica.....	62
6.2.6	Estimación con la el porcentaje de carga sobre la cura térmica.	63
6.2.7	Sujeto de prueba 2 HILANDERIAS – TIPO PADMOUNTED 2000KVA [15].....	63
6.2.8	Rango de tensión en LV, para el transformador, tomada desde reporte de pruebas con base a CIRCUTOR.....	64
6.2.9	Perfil de corrientes de carga en la subestación, de acuerdo a datos del analizador y el programa CIRCUTOR. [15].	65
6.2.10	Para los datos de potencia activa se tiene las siguientes variaciones de la potencia: [15].....	66

6.2.11	Datos son proporcionados por el test y las hojas del fabricante utilizadas en el mismo test: [15].	67
6.2.12	Resultado de estimación de la curva térmica.	67
6.2.13	Estimación con el porcentaje de carga sobre la curva térmica.	68
CONCLUSIONES		69
BIBLIOGRAFÍA		71
ANEXOS		74
A.	Código main.py	74
B.	Código circutorAnalysis.py	83
C.	Código exportFiles.py	85
D.	Imágenes de visitas a sujetos de prueba	86

LISTA DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1 Ejemplo de onda distorsionada FUENTE: Cortesía CIRCUITOR España	14
Ilustración 2 Esquema para la aplicación de la norma C57.110 Fuente EVALUACIÓN TÉRMICA EN TRANSFORMADORES DE POTENCIA, CARGABILIDAD Y EFECTOS EN LA VIDA ÚTIL DEL SISTEMA DE AISLAMIENTO pag.58.	36
Ilustración 3 Ilustración ejemplo de test realizados por fabricante fuente cortesía Grupo PELSA.....	40
Ilustración 4 Diagramas en lenguaje G del primer prototipo de instrumento virtual. Fuente: Tesis DESARROLLO DE UN INSTRUMENTO VIRTUAL. Pág. 33.....	41
Ilustración 5 Diagramas en lenguaje G del primer prototipo de instrumento virtual. Fuente: Tesis DESARROLLO DE UN INSTRUMENTO VIRTUAL. Pág. 34.....	41
Ilustración 6 Prototipo numero 1 desarrollada en la asignatura del EIE, FIA, UES Proyecto de ingeniería.	43
Ilustración 7 Resultado de la curva para prototipo I.....	43
Ilustración 8. Prototipo 2 desarrollo para esta investigación.	44
Ilustración 9 Flujograma abstracto de la versión final de Thermal Curve (prototipo 3)	45
Ilustración 10 Flujograma de ejecución de clases y funciones de herramienta virtual thermal curve.....	46
Ilustración 11 Flujograma la función themalcurve. calculate	47
Ilustración 12 Carga de archivos Tipo STD en CIRCUITOR POWER VISION	50
Ilustración 13 Selección de usos de listas (List).	51
Ilustración 14 Filtro de los datos que se utilizaran para el instrumento.....	51
Ilustración 15 Filtro de los datos que se utilizaran para el instrumento.....	52
Ilustración 16 Creación de archivo texto	52
Ilustración 17 Delimitadores para generar archivo .csv.....	53
Ilustración 18 Resultado Final de herramienta Thermal curve.....	54

Ilustración 19 Componentes de la herramienta Thermal curve	55
Ilustración 20 Características técnicas de sujeto de prueba 1	58
Ilustración 21 Placa con características técnicas de sujeto de prueba 1 Fuente; Cortesía GRUPO PELSA	59
Ilustración 22 Rango de tensión en LV, para el transformador	59
Ilustración 23 Tabla de resultados del rango de tensión.	59
Ilustración 24 Perfil de corrientes de carga en la subestación.	60
Ilustración 25 Variaciones de la potencia	60
Ilustración 26 Potencia aparente del sujeto de prueba 1.	61
Ilustración 27 Resultados de la curva térmica para sujeto de prueba 1	62
Ilustración 28 Resultado de curva térmica y curva de carga para sujeto de prueba 1	63
Ilustración 29 Placa con características técnicas de sujeto de prueba 2. Fuente; Cortesía GRUPO PELSA	64
Ilustración 30 Rango de tensión en LV, para el transformador sujeto de prueba 2	64
Ilustración 31 Perfil de corrientes de carga en la subestación de sujeto de prueba 2	65
Ilustración 32 siguientes variaciones de la potencia para sujeto de prueba 2	66
Ilustración 33 Curva de carga de la potencia aparente, sujeto de prueba 2	66
Ilustración 34 Resultados de la curva térmica para sujeto de prueba 2	67
Ilustración 35 Resultado de la curva térmica y cueva de carga para sujeto de prueba 2.	68

LISTA DE TABLAS

Tabla 1 Distribución armónica para ejemplo. Fuente: STD IEEE C57.110	22
Tabla 2 Cálculo tabulado del factor de pérdida armónica para el Ejemplo actual Fuente: Estándar IEEE Std C57.110-2018	23
Tabla 3 Consolidado de perdidas por efecto armónico. Fuente: IEEE Std C57.110-2018.....	24
Tabla 4 Tabla de cálculos corregidos debido a las cargas armónicas. Fuente: IEEE Std C57.110-2018.	24
Tabla 5 Estimación de la distribución del % total de pérdida de dispersión para transformadores inmersos en líquido.	27
Tabla 6 Datos iniciales para ejemplo del numeral 4.1 Fuente: IEEE Std C57.110-2018	29
Tabla 7 Distribución de pérdidas de ejemplo 4.1	29
Tabla 8 Temperatura en la superficie del líquido y en el punto más caliente del conductor para ejemplo del numeral 4.1.....	29
Tabla 9 Distribución armónica para punto 4.1.....	30
Tabla 10 Tabulación de cálculos para determinar los factores de pérdidas de armónicos para 4.1	30
Tabla 11 División de las pérdidas por Eddy y dispersión.....	31
Tabla 12 Tabulación de resultados de la ecuación anterior.	31
Tabla 13 Corrientes de línea mínima y máxima.	60
Tabla 14 Parámetros necesarios para la ejecución de la prueba en thermal curve para sujeto de prueba 1.	62
Tabla 15 Características técnicas de sujeto de prueba 2	63
Tabla 16 Resultados del rango de tensión.....	65
Tabla 17 Corriente de línea máxima y mínima para sujeto de prueba 2.....	65
Tabla 18 Parámetros necesarios para la ejecución de la prueba en thermal curve para sujeto de prueba 2	67

GLOSARIO

Armónicos:	Distorsión en la forma de onda sinusoidal de la corriente eléctrica provocada por energía de forma no lineal.
Carga:	Dispositivo conectado a la salida del transformador que regula su potencia de salida o la cantidad de voltaje que fluye.
Devanado:	Enrollamiento de alambre sobre núcleo, que usa inducción electromagnética para producir variación en una corriente.
Frecuencia:	Número de ciclos por segundo de una onda sinusoidal de corriente alterna.
Frecuencia fundamental:	Es la frecuencia más baja de una forma de onda periódica.
FHL:	Factor armónico de pérdidas para las corrientes parasitas en los devanados.
IEEE:	Instituto de Ingenieros eléctricos y electrónicos, cuyo fin brinda los estándares de funcionamiento y normativa.
LabView:	Software que proporciona un entorno de desarrollo gráfico para el diseño de aplicaciones de Ingeniería de adquisición de datos.
Por Unidad (PU):	Relación entre esta cantidad y la cantidad base y se expresa como un decima.
Perdidas de Eddy:	Se produce cuando un conductor atraviesa un campo magnético variable, o viceversa. También corrientes Foucault.
Perdidas parasitas:	Pérdidas de energía a través del efecto Joule, generando calor no deseado.
Punto caliente:	Aumento de temperatura en el lugar donde se tiene mayor flujo magnético del transformador.
Python:	Lenguaje de alto nivel de programación interpretado, multiplataforma de código abierto.
RAD :	Desarrollo Rápido de Aplicaciones por sus siglas en inglés, se trata de un modelo de desarrollo de aplicaciones ágil.
THD:	Distorsión armónica total, Indica la cantidad de componente armónico que contienen las formas de onda de voltaje y corriente.

OBJETIVOS

Objetivo General.

Evaluar y desarrollar un instrumento que permita una visualización del comportamiento térmico del trabajo de un transformador de potencia a partir de los datos obtenidos por medio de medición de calidad de la potencia.

Objetivos específicos.

Aplicar el Estándar IEEE Std C57.110 en el análisis térmico de transformadores de potencia con cargas no lineales.

Análisis y rediseño de un instrumento virtual de medición, realizado en plataforma LabVIEW, que permite obtener la curva térmica de un transformador de potencia.

Realizar estudio del comportamiento térmico de un transformador de potencia con cargas no lineales a partir de mediciones de calidad de la potencia.

Desarrollar un instrumento virtual para visualizar el gráfico de temperaturas de un transformador de potencia a partir de mediciones de la cantidad de potencia, basándose en estándares como IEEE C57-110 y otros.

ANTECEDENTES

El presente proyecto de ingeniería, es la continuación del tema de trabajo de graduación “Desarrollo de un instrumento virtual para visualizar la curva térmica de un transformador de potencia en servicio”

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Además de observar el régimen de operación en términos de la potencia suministrada, debe, simultáneamente desarrollar un análisis del comportamiento en cuanto a las variaciones de temperatura asociando al régimen de trabajo, aun con mayor énfasis cuando las corrientes o las cargas que alimentan a los transformadores son de naturaleza no lineal.

Conocer el comportamiento térmico nos permitirá hacer ajustes en la capacidad del suministro de potencia del transformador y el tomar precauciones para evitar daños en su sistema de aislamiento por funcionamiento con sobre temperaturas, garantizando de esta manera una extensión de la vida útil en el transformador.

JUSTIFICACIÓN

El tema contribuye al desarrollo y a la especialización del área de mediciones en sub estaciones de los sistemas de potencia. Creando mejores competencias en nuestros graduados que les permitirá un desempeño eficiente en el área de subestaciones.

INTRODUCCIÓN

Este documento Resume el desarrollo de un instrumento virtual para trazar la curva térmica en transformadores de potencia y distribución. El punto de partida es un trabajo de graduación anterior, en el cual se ha desarrollado un instrumento que necesita un software (LabVIEW) de pago para ejecutarse. La versión presentada en este documento es una aplicación diseñada bajo metodología de desarrollo rápido de aplicaciones (RAD por sus siglas en inglés) bajo lenguaje de programación Python y es independiente de cualquier software de pago y totalmente ejecutable en un entorno de Microsoft Windows en sus versiones con soporte actuales. El nombre designado para esta aplicación es: *Thermal curve*; para poder llegar al desarrollo de la herramienta, se inicia dando un pequeño resumen de los efectos de las cargas no lineales en transformadores generado por corrientes armónicas; luego un desglose de la norma IEEE Std C57.110 que da la punta de recomendaciones para poder establecer la capacidad de un transformador (nos interesa el análisis de transformadores sumergidos en líquidos) cuando es sometido a cargas no lineales. En base a las recomendaciones de la norma, que indica un procedimiento para calcular pérdidas por cargas no lineales a través de un análisis de corrientes armónicas y en base a estas pérdidas, un estimado de la temperatura del transformador en el punto más caliente (para transformadores trifásicos o banco de transformadores trifásicos sumergidos en líquidos). Se genera un algoritmo del cual deriva la herramienta virtual final.

Palabras clave: Armónicos, Distorsión Armónica, thermal curve, RAD, IEEE Std C57.110, Pérdidas nominales, pérdidas bajo carga, pérdidas corregidas.

I. EFECTOS DE LA DISTORSIÓN ARMÓNICA EN LA OPERACIÓN DE TRANSFORMADORES

Los transformadores son uno de los principales componentes de los sistemas de transmisión y distribución de energía, utilizados ampliamente en la industria eléctrica desde hace varios años, estos han venido evolucionando sus componentes, materiales de fabricación y la forma de los mismos a fin de hacerlos más eficientes y con dimensiones más reducidas. [1]

Un transformador eléctrico idealmente es definido como una maquina estática de corriente alterna que permite modificar alguna función de la corriente, como el voltaje, o la intensidad, manteniendo la frecuencia y la potencia.

En cuando a su construcción interna estos poseen dos sistemas de aislamiento, uno sólido que se encarga de recubrir el cobre de las bobinas que conforman el transformador; y el aislamiento líquido, el cual comúnmente es aceite, en el cual el bobinado del transformador se encuentra inmerso, y cumple tanto el propósito de aislamiento, como un elemento refrigerante conduciendo el calor desde las partes activas del transformador (núcleo y arrollamiento), ante los aumentos de temperatura que este equipo presenta. En cuanto al mantenimiento esta es una maquina eléctrica, virtualmente libre de mantenimiento puesto no presenta piezas móviles que presenten desgaste; sin embargo, para su correcto funcionamiento y por las condiciones que rodean a cada transformador estos requieren un mínimo de cuidado, y más aquellos que se ven sometidos a grandes demandas de potencia, corriente o voltaje. [1]

Tener un adecuado mantenimiento es de gran importancia para la vida útil de un transformador y la correcta planificación de sustitución, antes de un fallo total, el cual implica un coste económico elevado y reclamos de usuarios y multas; así mismo su puesta fuera de servicio antes del tiempo también se está desaprovechando el potencial de la unidad, suponiendo un manejo de recursos poco eficiente.

La estimación de la vida de un transformador no es algo sencillo, de obtener ya que la pérdida de vida, depende de varios factores como la calidad de fabricación, calidad de mantenimientos, régimen de temperatura de trabajo, grado de carga y condiciones ambientales en las que se encuentra instalado. Darle un adecuado seguimiento al mantenimiento del transformador brinda un aproximado estudio del estado del mismo, y estimaciones de la vida útil, permitiendo brindar a los usuarios un servicio de energía

eléctrica que cumpla con los indicadores de calidad exigidos por las normas de la SIGET que estaban basadas en estándares de prueba para transformadores IEEE. [1]

Esto conlleva tener una particular atención al estado del transformador en especial al aislante líquido, ya que a través de él podemos estimar el buen o mal funcionamiento que presenta el transformador, y prevenir futuras fallas y/o perturbaciones a los usuarios, y prever el correcto remplazo del transformador. [2] [3]

Para finalidad del presente trabajo de investigación se toma de referencia los estándares IEEE, los cuales establecen los procedimientos de prueba, modelos matemáticos para el cálculo de curva de temperatura en el punto más caliente (el aislamiento sólido), estimación aproximada del tiempo de vida. Se toman los estándares relacionados para modelar una herramienta que sea capaz de calcular la curva de temperatura del transformador, siguiendo las condiciones previas que cada estándar considera. [4]

Evaluación térmica para determinar la temperatura del transformador cuando operan bajo condiciones de corrientes de carga no lineales.

Las cargas no lineales que producen una extensa variedad de componentes que van desde inversores, variadores de velocidad, etc., hasta equipo electrónico como computadoras, impresores, televisores luminarias LED, etc. absorben de la red corrientes periódicas no senoidales. Estas corrientes están formadas por un componente fundamental de frecuencia 50 o 60 Hz, más una serie de corrientes superpuestas de frecuencias, múltiplos de la fundamental, que denominamos ARMÓNICOS ELÉCTRICOS, que generan costes técnicos y económicos importantes. [5]

El resultado es una deformación de la corriente, y como consecuencia de la tensión, conlleva una serie de efectos secundarios asociados.

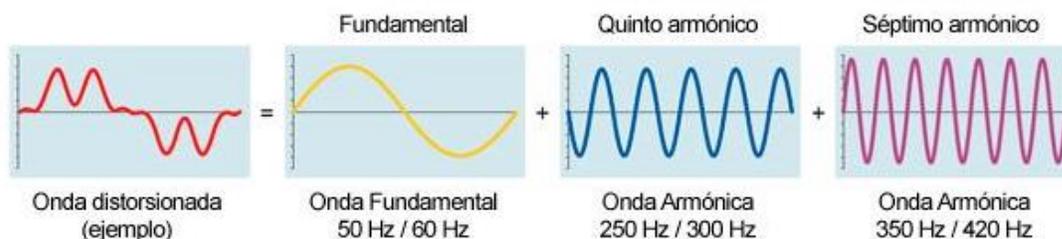


Ilustración 1 Ejemplo de onda distorsionada FUENTE: Cortesía CIRCUITOR España

1.1 Efectos de los armónicos.

Los principales efectos de los armónicos de tensión y corriente en un sistema de potencia se pueden citar:

- La posibilidad de amplificación de algunos armónicos como consecuencia de resonancia serie y paralelo
- La reducción en el rendimiento de los sistemas de generación, transporte y utilización de la energía(perdidas)
- El envejecimiento del aislamiento de los componentes de la red y, como consecuencia, la reducción de la energía [5]

Los armónicos eléctricos, entonces tienen consecuencias sumamente negativas para los transformadores de potencia y distribución. Las pérdidas que se generan por dichos armónicos, se traducen en un aumento de temperatura en el transformador. Resulta obvio pensar, entonces, que las condiciones nominales de operación no se cumplen y en la mayoría de casos no habrá una operación nominal, sino más bien una operación con pérdidas.

Antes de poder generar un cálculo de temperatura del transformador (en su punto más caliente) es indispensable determinar Cálculo de la Capacidad Equivalente del Transformador Mediante el Cálculo del Factor Armónico de Pérdidas.

El estándar IEEE Std C57.110-2018 [4] establece en su punto 6.1 una recomendación para poder calcular la capacidad equivalente del transformador mediante el cálculo del factor armónico de pérdidas.

Cuando un transformador es sometido a una corriente de carga que tiene un contenido armónico significativo, las pérdidas adicionales de corriente inducida en los conductores de los devanados y en las estructuras metálicas elevan la temperatura de esas partes por encima de la temperatura normal de funcionamiento en condiciones nominales. La experiencia ha demostrado que los conductores de los devanados son las partes más críticas cuando se quiere determinar una temperatura de funcionamiento aceptable. Por lo tanto, el objetivo debe ser evitar que las pérdidas en los devanados bajo condiciones de cargas con contenido armónico sean superiores a las pérdidas en condiciones nominales de operación. Los devanados internos (normalmente de baja tensión) de un transformador tienen típicamente mayores pérdidas por corrientes que los devanados externos.

Esto se debe a que el flujo electromagnético tiende a cerrarse por una trayectoria de la columna de baja reluctancia próxima a los yugos y elementos de sujeción, en las que se tiene un alto contenido radial de densidad de flujo. Además, las mayores pérdidas por corrientes parásitas ocurren generalmente en los conductores de los extremos del devanado interior. Esto es resultado del hecho que esta es la región de mayor densidad de flujo electromagnético radial (ver Ilustración 2) y el flujo radial pasa a través del ancho del conductor rectangular del devanado.

II. ANÁLISIS MATEMÁTICO PARA EL CALCULO DE PERDIDAS NO LINEALES EN TRANSFORMADORES

Nuestro interés primordialmente se centra en transformadores inmersos en líquido, sin embargo, la recomendación utiliza como base los cálculos iniciales para transformadores secos. La primera parte de la recomendación aplica tanto para transformadores secos como para inmersos en líquido.

Para empezar, sabemos por el IEEE Std C57.110-2018 [4] a manera general y sin entrar en detalle que la siguiente ecuación determina todas las pérdidas generadas por la carga en el transformador que está en operación:

$$P_{LL} = P + P_{EC} + P_{OSL} \quad (1)$$

Donde

P_{LL} es Perdidas bajo carga (W)

P es la porcion de perdidadas debido a I^2R bajo carga

P_{EC} es las perdidadas en los devanados debido a las corrientes de edyy

P_{OSL} es otras perdidadas bajo carga

Dado que la mayor preocupación acerca de un transformador que opere bajo condiciones de carga armónica será el sobrecalentamiento de los devanados, es conveniente considerar la densidad de pérdidas en los devanados por unidad (corriente de base es la corriente nominal y la densidad de la pérdida de base es la densidad de la pérdida de I^2R a la corriente nominal [4]. Al aplicar condiciones de carga nominal la ecuación (1) se puede expresar de siguiente forma:

$$P_{LL-R}(pu) = 1 + P_{EC-R}(pu) + P_{OSL-R}(pu) \quad (2)$$

La letra R (“rated” en inglés, ósea nominal) nos indica que estamos evaluando en base a valores nominales

Las pérdidas por corrientes parásitas debida a cualquier corriente de carga no sinusoidal definida se puede expresar de la siguiente manera [4]

$$P_{EC}(pu) = P_{EC-R}(pu) \sum_{h=1}^{h=h_{max}} I_h^2 (pu)h^2 \quad (3)$$

Donde

$P_{EC}(pu)$: Son las perdias por corrientes de eddy en el devanado, en por unidad.

$P_{EC-R}(pu)$: Perdidas por corrientes de eddy en el devanado en codicines nominales por unidad

h : el numero de orden armonico.

h_{max} : Es el orden de armonico mas grande.

$I_h(pu)$: La corriente rms en el harmonico h .

Dado que se necesita tener valores rms de la corriente de carga no sinusoidal se plantea la siguiente ecuación para calcularlo. [4]

$$I = \sqrt{\sum_{h=1}^{h=h_{max}} I_h^2} \quad (4)$$

Donde:

I : Es corriente de carga rms (amperios).

h : el orden armonico.

h_{max} : Es el orden armonico más significativo.

I_h : Es la corriente rms del armonico h

El valor rms de la corriente de carga no sinusoidal viene dado por

$$F_{HL} = \frac{\sum_{h=1}^{h=h_{max}} \left[\frac{I_h}{I} \right]^2 h^2}{\sum_{h=1}^{h=h_{max}} \left[\frac{I_h}{I} \right]^2} \quad (5)$$

Donde:

F_{HL} : Factor de perdidas en harmonicos, por corriente de eddy.

h : Es el orden armonico.

h_{max} : Es el armonico significativo mas alto.

I_h : Es la corriente rms en el armonico h (amperios).

I : Es la corriente rms de la carga.

2.1 Procedimientos recomendados para evaluar la capacidad de carga de los transformadores utilizando las perdidas por corrientes de Eddy.

Dado que las corrientes armónicas pueden aumentar sustancialmente las pérdidas por corrientes de Eddy en los devanados, dicho aumento de pérdidas debe considerarse en el cálculo del aumento de temperatura cuando se especifica un nuevo transformador. Para cada devanado, las pérdidas por corriente de Eddy en por unidad en la región de mayor densidad de pérdida se pueden definir para operación nominal de frecuencia a corriente nominal, que ha definido el fabricante del transformador en términos de la Ecuación (2), con POSL-R(PU) igual a cero (ya que no hay ninguna otra pérdida perdida en los devanados por definición). [4]

De manera que las regiones de mayor perdida por corrientes de Eddy se pueden calcular para la corriente de carga no sinusoidal combinando las ecuaciones (2), (3), (4) y (5) como muestra a continuación en la ecuación (6)

$$P_{LL}(pu) = I^2(pu) * (1 + F_{HL} * P_{EC-R}(pu)) \quad (6)$$

Donde

$P_{LL}(pu)$: Perdidas de carga en por unidad.

$I^2(pu)$: Corriente rms en por unidad.

F_{HL} : Es el factor de perdida en harmonicos en el devanado por corrientes de eddy.

$P_{EC-R}(pu)$: Perdidas en el devando por corriente de eddy en condicion nominal.

2.2 Cálculos y modificaciones adicionales para transformadores inmersos en líquido.

Los cálculos para transformadores sumergidos en líquido son similares a los transformadores de tipo seco, excepto que, el efecto de todas las pérdidas debe abordarse. Como lo indican las ecuaciones en IEEE Std C57.91 [6], para ONAN autoventilado modo, el aumento de temperatura en la superficie del líquido superior es proporcional a las pérdidas totales elevadas al exponente 0.8 y puede estimarse para las pérdidas armónicas, con base en la carga nominal y las pérdidas [6], como se muestra en la Ecuación (7) y la Ecuación (8).

$$\theta_{T0} = \theta_{T0-R} * \left(\frac{P_{LL} + P_{NL}}{P_{LL-R} + P_{NL}} \right)^{0.8} \quad (7)$$

Donde

θ_{T0} : Aumento de la temperatura del liquido sobre temperatura ambiente.

θ_{T0-R} : Aumento de temperatura del liquido en condiciones nominales.

P_{LL} : Perdidas de la carga (Watts).

P_{LL-R} : Son las perdidas de la carga en condiciones nominales.

P_{NL} : Perdidas sin carga (Watts)

$$P_{LL} = P + F_{HL} * P_{EC} + F_{HL-STR} * P_{OSL} \quad (8)$$

Donde

P_{LL} : Perdidas de la carga (Watts).

P : Es la porcion de perdidad por I^2R en perdiad en carga (Watts).

F_{HL} : Es el factror de perdidad en harmonicos en el devanado por corrientes de eddy.

P_{EC} : Son las perdidas por corriente de eddy en el devanado (Watts).

F_{HL-STR} : Factor de perdidas en harmonicos por perdida de desviación.

P_{OSL} : Son otras perdidas por desviación.

El aumento del conductor del punto más caliente del devanado también es proporcional a las pérdidas de carga al exponente 0.8 y puede ser calculado como en la Ecuación (9):

$$\theta_g = \theta_{g-R} * \left(\frac{I^2(pu) * (1 + F_{HL} * P_{EC-R}(pu))}{1 + P_{EC-R}(pu)} \right)^{0.8} \quad (9)$$

La sumatoria de los resultados de estas ecuaciones, nos dan como resultado el punto más caliente arriba de la temperatura ambiente como muestra la ecuación (10)

$$T_{\text{Punto mas caliente}} = \theta_g + \theta_{T0} \quad (10)$$

2.3 Ejemplo de cálculo del punto más caliente arriba de la temperatura ambiente.

Como ejemplo se tiene un 65°C de aumento de temperatura en el devanado, 80°C en el punto más caliente, del transformador inmerso en líquido fue diseñado para una corriente armónica específica. Luego de la instalación, las corrientes armónicas actuales fueron medidas y el espectro de corriente, fue provisto por el fabricante para la verificación de los aumentos de temperatura. En las pruebas hechas a 60 Hz, las pérdidas son las siguientes¹:

- Sin carga 4072 W
- FR: 27 821 W
- Perdidas de dispersión y Eddy: 4060 W
- Total, de perdidas 35 953 W

Los aumentos de temperatura medidos sobre T ambiente son los siguientes:

- Promedio HV: 48.1° C
- Promedio LV: 47.6° C
- Aumento en la superficie del líquido 47.2° C
- Punto más caliente en el conductor: 55.3° C

La distribución armónica fue determinada por en la carga, la cual fue aproximadamente el 100% de la magnitud de la frecuencia fundamental. La distribución armónica, fue normalizada a la fundamental, como se visualiza a continuación:

h	1	3	4	7	9	11	13	15	17	19	23	25
$\frac{I_h}{I_1}$	1.000	0.350	0.170	0.120	0.092	0.071	0.051	0.043	0.040	0.039	0.032	0.029

Tabla 1 Distribución armónica para ejemplo. Fuente: STD IEEE C57.110

¹ El ejemplo es una extracción de la página 27 a 29 de estándar IEEE C57.110-2018

Los cálculos para determinar los factores de pérdida armónica, en el devanado por corrientes de Eddy y otras pérdidas de dispersión, se muestran a continuación.

h	$\frac{I_h}{I_1}$	$\left(\frac{I_h}{I_1}\right)^2$	h^2	$\left(\frac{I_h}{I_1}\right)^2 h^2$	$h^{0.8}$	$\left(\frac{I_h}{I_1}\right)^2 h^{0.8}$
1	1.00000	1.00000	1	1.00000	1.00000	1.00000
3	0.35000	0.12250	9	1.10250	2.40822	0.29501
5	0.17000	0.02890	25	0.72250	3.62390	0.10473
7	0.12000	0.01440	49	0.70560	4.74328	0.06830
9	0.09000	0.00810	81	0.65610	5.79955	0.04698
11	0.05100	0.00260	121	0.31472	6.80948	0.01771
13	0.07100	0.00504	169	0.85193	7.78314	0.03923
15	0.04300	0.00185	225	0.41603	8.72716	0.01614
17	0.04000	0.00160	289	0.46240	9.64626	0.01543
19	0.03900	0.00152	361	0.54908	10.54394	0.01604
23	0.03200	0.00102	529	0.54170	12.28520	0.01258
25	0.02900	0.00084	625	0.52563	13.13264	0.01104
Σ		1.18838		7.84818		1.64320

Tabla 2 Cálculo tabulado del factor de pérdida armónica para el Ejemplo actual Fuente: Estándar IEEE Std C57.110-2018

La tercera columna de la sumatoria es 1.19. El la raíz cuadrada de este número resulta en la corriente rms por unidad de 1.09. La quinta columna de la sumatoria, dividido entre la tercera columna, resulta en el factor de pérdidas armónicas, en el devanado debido a las corrientes de Eddy, es de 6.53. La séptima columna de la sumatoria dividida entre la tercera columna, resulta en el factor armónico de pérdidas dispersas 1.38.

Un análisis de ingeniería indica que la división de las pérdidas por el efecto Eddy y de dispersión es:

Perdidas Eddy: 316 W	Perdidas por dispersión: 3744 W.	Total de perdidas por dispersión: 4060 W
----------------------	----------------------------------	--

Tabla 3 Consolidado de perdidas por efecto armónico. Fuente: IEEE Std C57.110-2018

En el orden de determinar el aumento en la superficie del líquido, el total de perdidas debe referirse a la corriente rms más alta, de acuerdo a los efectos de la corriente nominal de contenido armónico.

$$P_{LL}(pu) = P_{LL-R}(pu) * (1.09)^2 \quad (11)$$

Donde.

$P_{LL}(pu)$: Las perdidas por unidad.

$P_{LL-R}(pu)$: Las perdidas por unidad bajo condiciones nominales.

Los cálculos corregidos de las perdidas debido a las cargas armónicas de la ecuación anterior se tabulan a continuación:

Tipo de perdidas	Perdidas nominales.	Perdidas de carga	Multiplicador armónico	Corrección de perdidas.
Sin carga	4072	4072		4072
I^2	27 821	33107		33107
Perdidas de Eddy	316	376	6.53	2455
Perdidas por dispersión	3744	4455	1.38	6148
Total, de perdidas	35 953	42010		45782

Tabla 4 Tabla de cálculos corregidos debido a las cargas armónicas. Fuente: IEEE Std C57.110-2018

La temperatura del líquido para condiciones específicas de carga puede ser calculada por:

$$\theta_{TO} = \theta_{TO-R} * \left(\frac{P_{LL} + P_{NL}}{P_{LL-R} + P_{NL}} \right)^{0.8} = 47.2 * \left(\frac{45782}{35953} \right)^{0.8} = 57.3 \quad (12)$$

Donde:

θ_{TO} : Es la temperatura de liquido sobre temperatura ambiente.

θ_{TO-R} : Es el aumento de temperatura del liquido sobre T ambiente en condicion nominal.

P_{LL} : Son las perdidas de la carga.

P_{LL-R} : Son las perdidas en condiciones nominales.

P_{NL} : Son las perdidas sincarga.

El máximo de perdidas por corrientes de Eddy en valores por unidad, ocurre en el devanado de alto voltaje, y es calculado en un promedio de 2% en las perdidas óhmicas. Asumiendo el máximo de pérdidas de Eddy en la región del punto más caliente debe ser 4 veces el promedio de las pérdidas de Eddy puede dar un ser dar un 8% de las perdidas óhmicas de densidad en el punto más caliente. El punto más caliente del conductor en el aumento de temperatura en la superficie del líquido puede ser calculado por:

$$\theta_g = \theta_{g-R} * \left(\frac{I^2(pu) * (1 - F_{HL} * P_{EC-R}(pu))}{1 + P_{EC-R}(pu)} \right)^{0.8} = (55.3 - 47.2) * \left(\frac{1 + (6.53 * 0.08)}{1 + 0.08} * 1.19 \right)^{0.8} = 12.3 \quad (13)$$

Donde:

θ_g : Es punto mas caliente del conductor en el aumento de temperatura del liquido (°C)

θ_{g-R} : El punto mas caliente del conductor en subida de temperatura del liquido a condicones nominales

F_{HL} : Es el factor de peridas harmonicas debido a corrientes de eddy en el devanado.

$P_{EC-R}(pu)$: Peridas del devanado por corrientes de eddy en por unidad a condiciones nominal.

El punto más caliente del conductor sobre la temperatura ambiente es:

$$57.3^{\circ} C + 12.3^{\circ} C = 69.9^{\circ} C$$

III. CALCULO DEL EQUIVALENTE DE CAPACIDAD DEL TRANSFORMADOR USANDO DATOS DISPONIBLES DE INFORME CERTIFICADO DE PRUEBA

Para realizar el cálculo con datos limitados, se consideran ciertos supuestos que se muestran en este punto. Es importante recalcar que los resultados son conservadores, es decir la precisión de estos no es del 100%.

La norma tampoco indica que nivel de precisión se alcanza. Las estimaciones también están dirigidas a transformadores más pequeños, generalmente de menos de 5000 kVA. [4]. Por tanto, el instrumento de medición de la temperatura en el punto más alto está diseñado para transformadores que no sobrepasen esta capacidad.

De manera que para poder establecer los cálculos se deben tomar las siguientes consideraciones establecidas en el IEEE Std C57.110™-2018:

- La rutina de pruebas incluye todos los datos exigidos por IEEE Std C57.12.00 o IEEE Std C57.12.91.
- Una porción de las pérdidas por dispersión se supone que son por pérdidas parásitas
- En los devanados (al no contar con mejores datos se debe utilizar este caso) por lo tanto se tiene la siguiente distribución:
 - a. El 67 % de las pérdidas por dispersión se suponen pérdidas por corrientes parásitas para los devanados de transformadores de tipo seco.
 - b. El 33% de las pérdidas por dispersión se supone que son pérdidas por corrientes parásitas en los devanados de los transformadores sumergidos en líquido.
 - c. Las pérdidas se suponen que se distribuyen uniformemente en cada devanado.
- La distribución de las pérdidas por corrientes parásitas entre los devanados se supone:
 - a. El 60% en el devanado interior y 40% en el devanado exterior para los transformadores auto refrigerados, con corriente nominal menor de 1000A todo esto independientemente de la relación de vueltas.

- b. EL 60% en el devanado interior y el 40 % en el devanado exterior para los transformadores que tienen una relación de vueltas 4:1 o menos
- c. El 70% en el devanado interior y el 30% en el devanado exterior para todos los transformadores que tienen una relación de vueltas mayor que 4:1 y auto refrigerados con corriente nominal mayor a 1000A.
- La distribución de pérdidas por corrientes parásitas en los devanados se supone que no es uniforme.
- La pérdida máxima por corrientes parásitas en devanados se supone que es en la región del punto más caliente del devanado y es igual al 400% de la densidad promedio de las perdidas por corrientes parásitas en los devanados.

Los puntos anteriores para transformadores sumergidos en aceite están condensados en las siguientes tablas que también están disponibles en el estándar IEEE Std C57.110™-2018:

Estimación de distribución del total de porcentaje de perdidas por dispersión, para transformadores inmersos en líquido			
Rango de KVA	Perdidas de Eddy en el devanado		Otras perdidas de dispersión
	Devanado LV	Devanando HV	
≤300	55	5	40
>300	40	10	50
≤ 1000			
>1000	20	10	70
≤ 3000			
>3000	25	15	60

Tabla 5 Estimación de la distribución del % total de pérdida de dispersión para transformadores inmersos en líquido.

Según lo establecido en los códigos de prueba IEEE Std C57.12.90 e IEEE Std C57.12.91, el componente de pérdida de dispersión de la carga, la pérdida se calcula restando la pérdida I^2R del transformador de la pérdida de carga medida. Como se muestra en la ecuación (14)

$$P_{TSL-R} = P_{LL-R} - K * [(I_{1-R})^2 * R_1 + (I_{2-R})^2 * R_2]$$

Donde:

P_{TSL-R} es el total de pérdidas extravidas bajo condiciones nominales

P_{LL-R} es la carga perdida bajo condiciones nominales

K es una constante que depende del número de fases: 1 para transformadores monofásicos y 1.5 para transformadores trifásicos

I_{1-R} es la corriente de línea fundamental rms de alto voltaje (HV) bajo frecuencia nominal y carga nominal

R_1 es la resistencia de CC medida entre dos terminales HV

I_{2-R} es la corriente de línea fundamental de bajo voltaje (LV) rms bajo frecuencia nominal y carga nominal

R_2 es la resistencia de CC medida entre dos terminales de baja tensión (ohmios)

Para poder observar las consideraciones realizadas en al inicio de este apartado se utiliza el ejemplo práctico presente en el estándar IEEE Std C57.110™-2018

3.1 Ejemplo práctico para Cálculos típicos para transformadores sumergidos en líquido usando datos disponibles de informe de prueba certificado.

El siguiente ejemplo ilustra la corrección del cálculo de la temperatura, para un transformador inmerso en líquido de acuerdo a la norma IEEE Std. C57.12.00, este basado en características tomadas de un reporte de test certificado.

Voltaje en el devanado de alta - 34 500V Delta - Resistencia de 18.207 Ω @ 75° C	Voltaje en devanado de baja - 2400V Estrella - Resistencia de 0.02491 Ω @ 75° C	Capacidad - 2500 kVA - Trifásico - 55° C en promedio por fase - 65° C en el punto más caliente
Tipo ONAN con refrigeración Sin pérdidas de carga 5100 W	Resistencias es al sumatoria de las 3 fases en serie. Los valores	Valores para I_{1-R} y I_{2-R} calculados desde kVA y los rangos de voltaje.

Perdidas carga en 75° C = 21 941 W	R1 y R2 pueden ser determinados usando R1: 4.046 Ω R2: 0.01661 Ω	$I_{1-R} = 41.8 A$ $I_{2-R} = 601.4 A$
------------------------------------	--	---

Tabla 6 Datos iniciales para ejemplo del numeral 4.1 Fuente: IEEE Std C57.110-2018

El total de perdidas por dispersión puede ser calculado:

$$P_{TSL-R} = 21941 - 1.5 * (41.8^2 * 4.046 + 601.4^2 * 0.01661)W$$

$$P_{TSL-R} = 21941 - 1.5 * (7069 + 6008)W$$

$$P_{TSL-R} = 21941 - 19615 = 2326 W$$

Las perdidas por corrientes de Eddy en los devanados pueden ser calculadas de la siguiente manera:

$$P_{EC-R} = 2326 * 0.3 = 698 W$$

Usando la ecuación por otras perdidas de dispersión tenemos:

$$P_{OSL-R} = 2326 - 698 = 1628 W$$

Los datos pueden ser ordenados de la siguiente forma.

Sin carga 5100 W	$I^2R : 19615 W$	Dispersión y corrientes de Eddy: 2326 W	Total de perdidas 27041 W
------------------	------------------	---	---------------------------

Tabla 7 Distribución de pérdidas de ejemplo 4.1

Asumimos el aumento de temperatura ambiente de la siguiente manera:

Promedio de HV y LV: 55° C	Aumento en la superficie del líquido 55° C	Punto más caliente del conductor 65° C
----------------------------	--	--

Tabla 8 Temperatura en la superficie del líquido y en el punto más caliente del conductor para ejemplo del numeral 4.1.

La distribución armónica fue determinada en la carga aproximadamente del 75% de la magnitud de la corriente fundamental. La distribución debe ser normalizada a la fundamental se muestra en la siguiente tabla.

h	1	3	5	7	9	11	13	15	17	19
$\frac{I_h}{I_1}$	1	0.45	0.27	0.19	0.092	0.071	0.051	0.043	0.04	0.039

Tabla 9 Distribución armónica para punto 4.1

Los cálculos para determinar los factores de pérdidas de armónicos debido a las pérdidas en el devanado por efecto Eddy y otras pérdidas $\frac{I_h}{I_1}$ por dispersión, se tabulan en la siguiente tabla:

h	$\frac{I_h}{I_1}$	$\left(\frac{I_h}{I_1}\right)^2$	h^2	$\left(\frac{I_h}{I_1}\right)^2 h^2$	$h^{0.8}$	$\left(\frac{I_h}{I_1}\right)^2 h^{0.8}$
1	1	1	1	1	1	1
3	0.4500	0.2025	9	1.8225	2.4082	0.4877
5	0.2700	0.0729	25	1.8225	3.6239	0.2642
7	0.1900	0.0361	49	1.7689	4.7433	0.1712
9	0.0920	0.0085	81	0.6856	5.7995	0.0491
11	0.0710	0.0050	121	0.6100	6.8095	0.0343
13	0.0510	0.0026	169	0.4396	7.7831	0.0202
15	0.0430	0.0018	225	0.4160	8.7272	0.0161
17	0.0400	0.0016	289	0.4624	9.6463	0.0154
19	0.0390	0.0015	361	0.5491	10.5439	0.0160
Σ		1.3326		9.5765		2.0743

Tabla 10 Tabulación de cálculos para determinar los factores de pérdidas de armónicos para 4.1

La tercera columna de la sumatoria es 1.33. La raíz cuadrada de este número resulta en la corriente por unidad de 1.15. La quinta columna de la sumatoria dividida entre la tercera columna resulta en los factores armónicos de pérdidas, por dispersión debido a las pérdidas de Eddy que es de 7.18. La sumatoria de la séptima columna dividida entre la tercera columna resulta en el factor armónico por otras pérdidas por dispersión.

De la división de las pérdidas por Eddy y las de dispersión, se ordenan de la siguiente manera:

Perdidas por Eddy 698 W.	Perdidas por dispersión 1628 W.	Total, de pérdidas por dispersión 2326 W.
--------------------------	---------------------------------	---

Tabla 11 División de las pérdidas por Eddy y dispersión.

Para determinar el aumento de temperatura en la superficie del líquido, el total de pérdidas debe ser corregido y referido al valor más bajo de corriente rms, bajo condiciones nominales de la corriente y también por los efectos del contenido armónico. La corriente rms debe ser corregida al 75% de la carga, como lo muestran los resultados de la siguiente multiplicación para determinar las pérdidas a específicas condiciones de carga.

$$P_{LL}(pu) = 1.15^2 * 0.75^2 = 0.74$$

La ecuación anterior se tabula de la siguiente manera.

Tipo de pérdidas	Perdidas nominales(W)	Perdidas en la carga (w)	Multiplicador armónico	Perdidas corregidas
Sin carga	5100	5100		5100
I^2R	19 615	14 515		14 515
Devanado Eddy	698	516	7.184	3707
Dispersión	1628	1205	1.556	1875
Total, de pérdidas	27 041	21 336		25 197

Tabla 12 Tabulación de resultados de la ecuación anterior.

La temperatura en la superficie ahora puede ser calculada de la siguiente manera.

$$\theta_{TO} = 55 * \left(\frac{25761}{27041}\right)^{0.8} = 52.0^\circ C$$

El rango interno o pérdidas de devanado LV, se calculan:

$$I_{2-R}^2 R = 1.5 * 601.4^2 * 0.01661 = 9011 W$$

Las pérdidas por condiciones específicas de carga son:

$$I_2^2 R = 9011 * (1.15 * 0.75)^2 = 6703 W$$

Se asumió un 20% de las pérdidas de devanado por Eddy, en el devanado LV. El máximo de pérdidas por Eddy en la región del punto más caliente se puede asumir que es cuatro veces el promedio de las pérdidas por Eddy. El punto más caliente del conductor en el aumento de temperatura en la superficie del líquido puede ser calculado usando la unidad de Watts en lugar de valores por unidad.

$$\theta_g = (65 - 55) * \left(\frac{6703 + (3707 * 0.2 * 4)}{19615 + 698}\right)^{0.8} = 10 * \left(\frac{6703 + 2966}{20313}\right)^{0.8} = 5.52^\circ C$$

El punto más caliente en el conductor sobre la temperatura ambiente es:

$$52.0 + 5.52 = 57.2^\circ C$$

IV.INTRODUCCIÓN AL DESARROLLO DE INSTRUMENTO VIRTUAL PARA TRAZAR LA CURVA TÉRMICA DE CALOR

El desarrollo de software se refiere a un conjunto de actividades informáticas dedicadas al proceso de creación, diseño, despliegue y compatibilidad de software Para tener un sistema de desarrollo planificado se debe elegir una metodología de desarrollo de software. [7].

Para la herramienta virtual estamos diseñando un Software de aplicación que no es más que programas que ayudan a los usuarios a realizar tareas dentro de un entorno o sistema operativo, las tareas pueden ir desde un simple editor de texto, hasta Editores CAD y video. Nuestra herramienta será precisamente eso, una ayuda a técnicos e ingenieros para verificar temperaturas de transformadores en servicio.

4.1 Generalidades del desarrollo de aplicaciones.

IBM en su sitio web global nos da una guía del paso a paso general que hay que adoptar en el desarrollo, para nuestro caso se han elegido las más críticas o importantes. [7]

- **Seleccionar una metodología:** para establecer un marco en el que se apliquen los pasos del desarrollo de software. Describe un proceso de trabajo general o un roadmap para el proyecto. Las metodologías pueden incluir Desarrollo ágil, DevOps, Desarrollo rápido de aplicaciones (RAD), Marco ágil escalado (SAFe), Cascada y otros. (Consulte el glosario).
- **Recopilar requisitos:** para comprender y documentar lo que requieren los usuarios.
- **Elegir o crear una arquitectura:** como la estructura subyacente dentro de la cual operará el software.
- **Desarrollar un diseño en torno a soluciones:** para los problemas presentados por los requisitos, que a menudo involucran modelos de proceso y guiones gráficos.
- **Crear código en el lenguaje de programación apropiado:** Involucra la revisión de expertos y en equipo para solucionar problemas en etapas tempranas y producir software de calidad más rápido.

- **Realizar pruebas con escenarios planificados previamente:** como parte del diseño y codificación de software, y realizar pruebas de rendimiento para simular pruebas de carga en la aplicación.

4.2 Metodología del diseño de la herramienta.

Debido a la necesidad latente de un diseño rápido y que permita cambios regulares en el requerimiento original, se ha seleccionado una metodología de diseño que cumpla estos criterios.

4.2.1 Desarrollo rápido de aplicaciones (RAD).

El desarrollo rápido de aplicaciones, concebido en la década de 1970 pero presentado oficialmente por James Martin en 1991, es una metodología que se centra en desarrollar aplicaciones rápidamente por medio de iteraciones frecuentes y aprobaciones con comentarios continuos de los clientes. Al priorizar los lanzamientos de prototipos ágiles y rápidos, RAD incide en la usabilidad del software, los comentarios de los usuarios y la entrega rápida a través de una planificación a largo plazo y un único conjunto de requisitos iniciales para la creación de elementos, como las aplicaciones personalizadas. [8]

Los beneficios clave de la metodología RAD son:

- Reducción del tiempo de desarrollo y aceleración de la entrega.
- Mejora de la flexibilidad y la adaptabilidad.
- Mejor gestión de riesgos.
- Menos codificación manual y tiempos de prueba más cortos.
- Comentarios de los usuarios constantes, relevantes y en tiempo real.

4.2.2 Pasos del desarrollo rápido de aplicaciones

- *Definición de los requisitos del proyecto.*
- *Creación de prototipos.*
- *Creación, pruebas e incorporación de comentarios.*
- *Finalización e implementación.*

4.3 Implementación del método desarrollo rápido de aplicaciones (RAD) para de instrumento virtual para trazar la curva térmica en transformadores de potencia.

Utilizando la metodología recomendada por Microsoft y luego de definir parámetros introductorios, se procede entonces a aplicar el método RAD para el desarrollo de la herramienta. [7]

4.3.1 Definición de los requisitos del proyecto.

En los capítulos anteriores se expone la metodología que presenta IEEE Std C57.110 en cuanto al cálculo de pérdidas en transformadores bajo las normas IEEE Std C57.12.00 y NEMA ST20-1992, para el caso en particular de estudio y las pruebas certificadas necesarias para hacer los respectivos cálculos de incrementos de temperatura en el aceite y otros puntos de interés.

En el siguiente esquema se encuentra un diagrama de flujo que resume la aplicación del estándar IEEE Std C57.110, con el cual se puede realizar un segundo flujograma que contiene la lógica del algoritmo para la implementación en código de la herramienta virtual.²

² El diagrama ha sido extraído del trabajo de *graduación Evaluación térmica en transformadores de potencia, cargabilidad y efectos en la vida del sistema de aislamiento. Bajo licencia CC BY-NC-ND créditos a William salvador Martínez Amaya, Luis mauricio Ramírez Sorto, Pedro Antonio soto Hernández* disponible en el repositorio institucional de la Universidad de El Salvador en el siguiente enlace <https://ri.ues.edu.sv/id/eprint/6538>

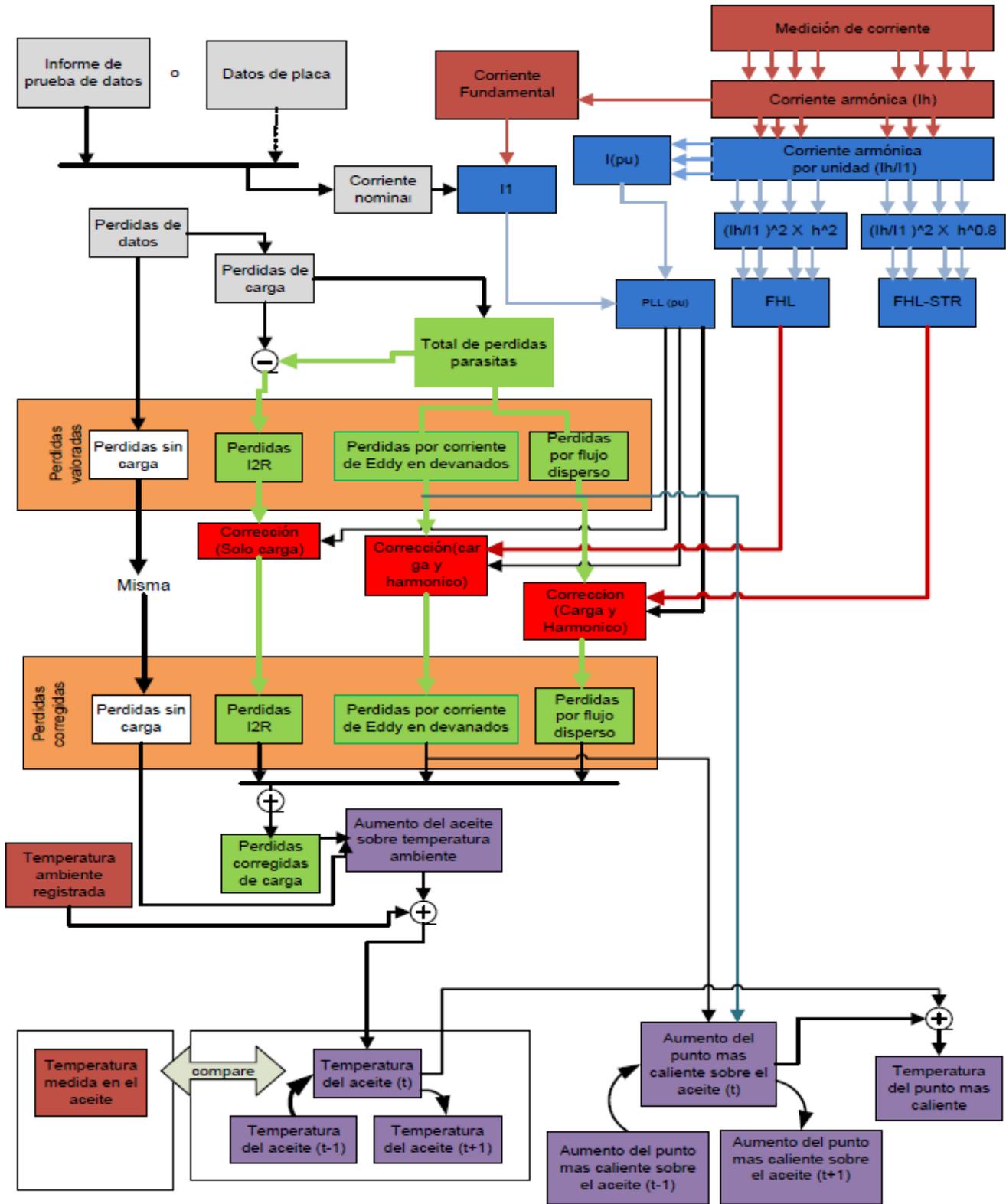


Ilustración 2 Esquema para la aplicación de la norma C57.110 Fuente EVALUACIÓN TÉRMICA EN TRANSFORMADORES DE POTENCIA, CARGABILIDAD Y EFECTOS EN LA VIDA ÚTIL DEL SISTEMA DE AISLAMIENTO pag.58.

4.3.2 Herramientas de medición necesarias para el instrumento virtual.

Como se aprecia en la ilustración (2) se tiene un proceso respaldado de la norma IEEE Std C57.110, de manera que, el objetivo fundamental es poder plasmar en código el instrumento virtual que pueda repetir un proceso iterativo que calcule cada punto de medición realizado.

Es necesario delimitar las herramientas que el programa debe utilizar con el fin de trazar la curva de calor, estas herramientas son:

4.3.3 Analizador de redes eléctricas.

El analizador de redes eléctricas es un instrumento que permite analizar diferentes propiedades de una instalación. Se centra especialmente en los parámetros de dispersión (Parámetros-S) y los datos que arroja permiten llevar un control exacto del consumo de energía eléctrica. [9]

4.3.3.1 Parámetros que mide el analizador de redes [9].

- Flickers: variación rápida de tensión que se presenta de forma repetitiva y permanente.
- Armónicos: distorsión en la forma de onda sinusoidal de la corriente eléctrica provocada por un aparato que consume energía de forma no lineal.
- Distorsión armónica (THD) de corriente y tensión: suma de la distorsión producida por todos los armónicos.
- Valor eficaz: El valor eficaz de una corriente alterna es el valor que tendría una corriente continua que produjera la misma potencia al aplicarla sobre la misma resistencia.
- Potencia y factor de potencia: la potencia es la cantidad de energía eléctrica que transporta el circuito por unidad de tiempo, y el factor de potencia permite comparar la energía extraída de la red con la energía útil que obtenemos tras su paso por la red.

4.3.3.2 Analizador de redes eléctricas disponibles en el mercado local.

Actualmente El Salvador no produce Esta tecnología, sin embargo, se importan una variedad de fabricantes, siendo los más relevantes dos:

- Fluke: según su sitio web ofrece productos y software de prueba, medición y monitoreo que se utilizan en el diseño electrónico, la fabricación y la solución de problemas de redes, así como en aplicaciones eléctricas, industriales, médicas, de proceso y de calibración.³ Este es comercializado por Electrolab Medic, S.A. de C. V⁴
- CIRCUTOR según su sitio web con más de 45 años de experiencia, dispone de 6 centros productivos en España y la República Checa, que trabajan en el diseño y fabricación de equipos destinados a mejorar la eficiencia energética: equipos de medida y control de la energía eléctrica y de la calidad del suministro, protección eléctrica industrial, compensación de reactiva y filtrado de armónicos, recarga Inteligente de vehículos eléctricos y energías renovables. Este es comercializado por PROVEEDORA ELÉCTRICA EL SALVADOR S.A. de C.V. (PELSA)⁵

Por lo complejo que resulta el manejo de datos la herramienta virtual esta desarrollada para trabajar con los analizadores de red CIRCUTOR y su formado de lógica de datos (corrientes armónicas y potencia aparente).

4.3.3.3 Software PowerVision

PowerVision es software de lectura, descarga y análisis de ficheros generados por equipos CIRCUTOR con memoria interna. Este programa se utiliza solamente para poder elegir los datos a extraer y pasarlos a un formato CSV que se puede manipular fácilmente. El software es totalmente gratuito y está disponible en el sitio oficial de CIRCUTOR⁶

³ Disponible en <https://www.fluke.com/es-es/soporte/acerca-de-nosotros>

⁴ En la página oficial de fluke Electrolab medic aparece como vendedor autorizado <https://www.fluke.com/es-sv/donde-comprar>

⁵ Información disponible en el centro de soluciones de ingeniería disponible en https://www.grupopelsa.com/_csi.aspx?goserv=4&over=SI&gname=%20Automatizaci%C3%B3n

⁶ Disponible en http://docs.circutor.com/docs/PowerVision_1-8c04-08-2011.rar

Permite la comunicación con equipos, descarga de los archivos de la memoria para el posterior análisis y la parametrización (dependiendo del modelo) remota de los mismos. Es una herramienta de altas prestaciones que eleva la potencia de información registrada por los equipos.

4.3.3.4 Datos mínimos que debe proporcionar en analizador de redes eléctricas.

Para poder realizar los cálculos descritos en 4.1 se necesita que el analizador pueda generar las siguientes mediciones

- Cálculo de distorsión armónica (por lo menos 25 armónicos).
- Guardar datos generados en mediciones que duran 5 días o más.
- Cálculo de potencia aparente.

4.3.4 Hoja de pruebas bajo IEEE C57.12.00-2015.

La hoja de pruebas que contiene información crítica para poder ejecutar los cálculos indicados IEEE Std C57.110. La mayoría de fabricantes no incluyen todas las pruebas indicadas. Para efectos prácticos y poder realizar los cálculos de las pérdidas se necesitan los siguientes resultados.

- Medidas de resistencias de todos los devanados (LV Y HV), Esta prueba en el país es conocida como *prueba de micro resistencia*.
- Pérdidas sin carga y corriente de excitación en 100% de los valores nominales de tensión y valores nominales de frecuencia de en la derivación de tensión nominal.
- Pérdidas con carga y corriente de excitación en 100% de los valores nominales de tensión y valores nominales de frecuencia de en la derivación de tensión nominal.



PROLEC GE
Industrial Transformers Division
Blvd. Carlos Salinas de Gortari Km. 9.25, Apodaca, N.L.

Certified Test Report

GE REQ# F46A9TD605583
SHOP ORDER: RHY251
3 Phases, 60 Hz Cooling: ONAN
High Voltage Winding
1000 kVA
22860 Volts Connection: Delta BIL: 125 kV
TAPS: 24000 V 23432 V 22860 V 22289 V 21717 V

Report: RHY251 - 11 - 002
Polarity: SUBTRACTIVE
Low Voltage Winding
1000 kVA BIL: 30 kV
480 Volts Connection: Wye

Purchaser: PROVEDORA ELECTRICA EL S
Purchaser Order: PO-067-07-2021E-3

Transformer Ratio Test Results					Ohmic Resistance Average		Insulation Resistance Test			
Serial	Phase A	Phase B	Phase C	Calc.	Corrected Values at 20°C		Test Voltage: 2500 VDC	Test Temperature: 30.6 °C		
TAP					Pos.	HV	LV			
No. 1	86.505	86.520	86.505	86.513	3	5.2702 Ω	0.001458 Ω	30 sec.	1 min	AI
No. 2	84.445	84.450	84.440	84.553				15316 MΩ	21233.4 MΩ	1.39
No. 3	82.380	82.395	82.385	82.489				14335 MΩ	22630.9 MΩ	1.68
No. 4	80.320	80.325	80.315	80.429						
No. 5	78.255	78.265	78.255	78.364						

Insulation Power Factor, %
CI+ 0.46 CL 0.319 CHL 0.41
Capacitance (Picofarads)
CH 2120 CL 6578.36 CHL 4890.48

W = Watts, Z = Impedance, % = percent, mA = milliamperes

No Load Losses And Excitation Current (Corrected values at 20°C)

Rated Voltage 480 V	% Exc	100%
Test Temperature 30.6 °C	No Load Losses	1777.70 W
	0.262	

Load Losses (Corrected to reference temperature 85°C)

Rated Voltage Tap: 3	Tap 3 Losses	%Z
Rated Voltage 22860 V	11146.80 W	5.75
KVA Cooling 1000 ONAN 85 °C		

Serial M2118559	Regulation (PF)	100%	90%	80%	50%	75%
		1.2719	3.5638	4.3042	4.3471	4.6255

Serial M2118559	Efficiency:	125%	100%	75%	50%	25%	(% of Full Load)
		98.49	98.72	98.94	99.10	99.02	

Temperature Rise given by basic design is verified with test results on thermal duplicate or duplicate unit

Dielectric Test

Applied Voltage Test			Induced Voltage Test		Routine Impulse Test		
Rated Voltage	Applied Voltage	Test Time	Twice:	480 Volts to 240 Hz per 7200 cycles	HV reduced wave	62.5 kV HV Full Wave	125 kV
22860 V	40 kV	60 Sec					
480 V	10 kV	60 Sec					

Insulation Liquid Test		Leak Test	
Power Factor 0.311 %	Dielectric Breakdown 46.9 kV	PSI 7	Time 4 hours

Summary of Results			
Tests	Measured	Guaranteed	Results
No Load Losses:	1777.70 W		Accepted
Excitation Current:	0.262 %		Accepted
Load Losses:	11146.80 W		Accepted
Total Losses:	12924.50 W		Accepted
Impedance Voltage(%):	5.75 %	5.32 - 6.18	Accepted

This certify that is a reliable report based on manufacturer tests, according with the latest version of IEEE std. C57.12.80 (Test Code) and is applicable only for the product identified with the shop order on this report

Customer:
Test Date : 10/15/2021
Issued Date : 12/15/2021

Approved:

Total or partial copies are not allowed without Prolec G.E.S. de R.L. de C.V. authorization

Form : 10.9-C

Ilustración 3 Ilustración ejemplo de test realizados por fabricante fuente cortesía Grupo PELSA

4.4 Creación de prototipos.

Para poder generar un prototipo rápidamente se utilizó el modelo presentado en la tesis “DESARROLLO DE UN INSTRUMENTO VIRTUAL PARA VISUALIZAR LA CURVA TÉRMICA DE UN TRANSFORMADOR DE POTENCIA EN SERVICIO” [10] poner referencia

En este trabajo de investigación que precede al nuestro, se desarrolló en software en LabVIEW. El flujograma que seguía es el siguiente.

- Para cálculo de θ_{T0} :

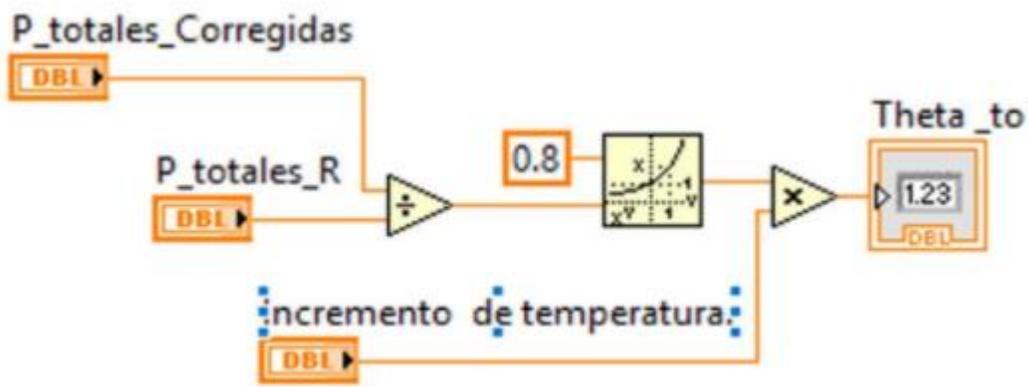


Ilustración 4 Diagramas en lenguaje G del primer prototipo de instrumento virtual. Fuente: Tesis DESARROLLO DE UN INSTRUMENTO VIRTUAL. Pág. 33

- Para cálculo de θ_g :

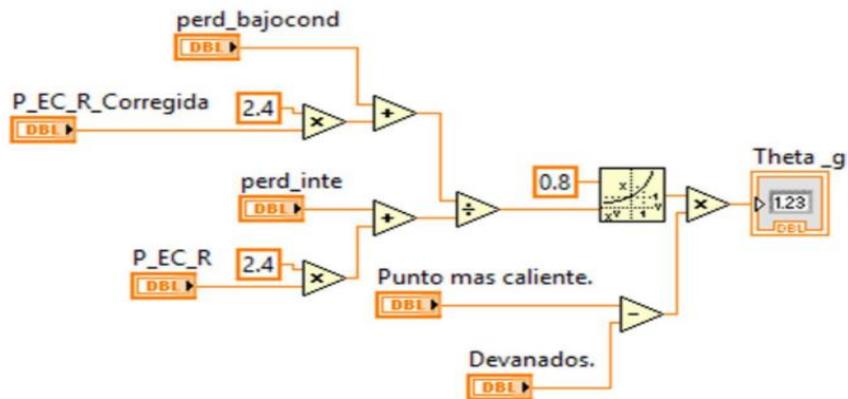


Ilustración 5 Diagramas en lenguaje G del primer prototipo de instrumento virtual. Fuente: Tesis DESARROLLO DE UN INSTRUMENTO VIRTUAL. Pág. 34

Con estos flujogramas que siguen nomenclatura LabVIEW en lenguaje de programación G⁷ tenemos un prototipo de programa que nos da un punto de arranque para desarrollar una nueva aplicación.

4.4.1 Selección de lenguaje de programación.

La asociación IEEE Spectrum [11] ha realizado una clasificación de los lenguajes más utilizados, utilizando encuestas propias, datos de Google y de GitHub. En ella, de los diferentes lenguajes analizados aparece Python como el más popular, seguido de JavaScript, PHP y Ruby.

En la práctica, el uso de un lenguaje u otro varía mucho en función de las necesidades y también de las preferencias del propio desarrollador. A pesar de ello, la encuesta de IEEE nos señala una tendencia en la que los lenguajes de código abierto son los preferidos por los desarrolladores al permitir estudiar, modificar y mejorar su diseño.

Debido a la versatilidad y familiaridad se ha elegido Python⁸ como lenguaje para programar la herramienta virtual.

⁷ Manual de programación de lenguaje G disponible en sitio oficial <https://www.ni.com/pdf/manuals/321296b.pdf>

⁸ Sitio Web oficial del lenguaje de programación <https://www.python.org/>

4.4.2 Prototipo inicial del instrumento programado en Python.

Para efectos de resumen, solo se incluye una captura del programa prototipo [12].

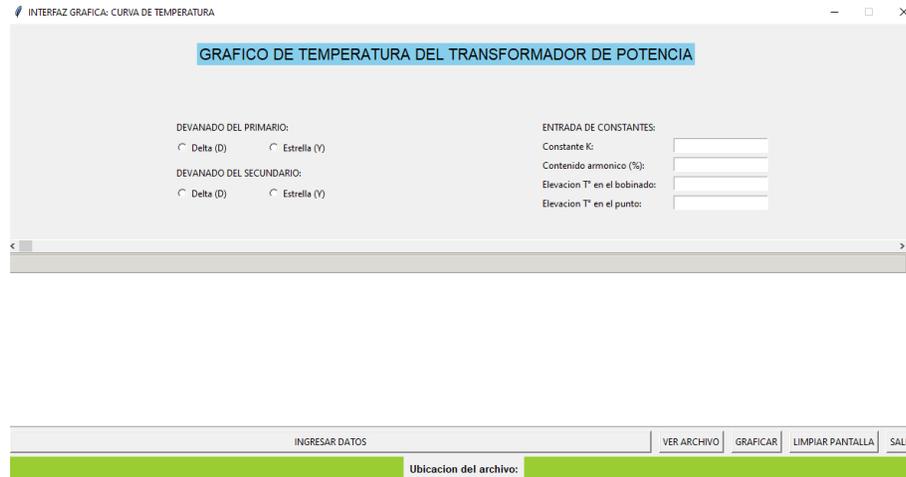


Ilustración 6 Prototipo numero 1 desarrollada en la asignatura del EIE, FIA, UES Proyecto de ingeniería.

Resultado de la gráfica de la curva de temperatura para prototipo I.

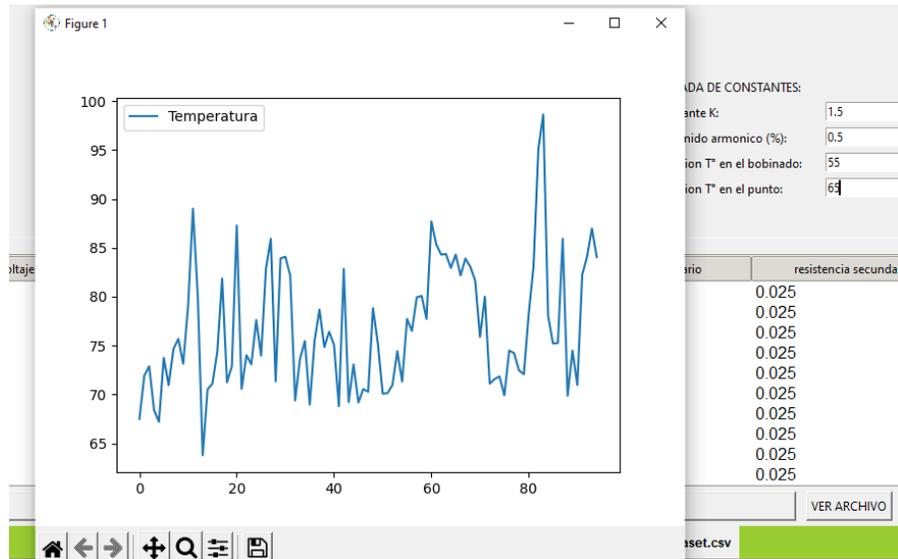


Ilustración 7 Resultado de la curva para prototipo I

4.5 Creación, pruebas e incorporación de comentarios.

Para la segunda versión se corrigen muchos errores que el primer prototipo presentaba entre los principales están

- Corrección de cálculo primario para θ_g
- Automatización de proceso de ingreso de datos
- Rediseño de GUI
- Asignación de nombre al instrumento: *Thermal Curve*

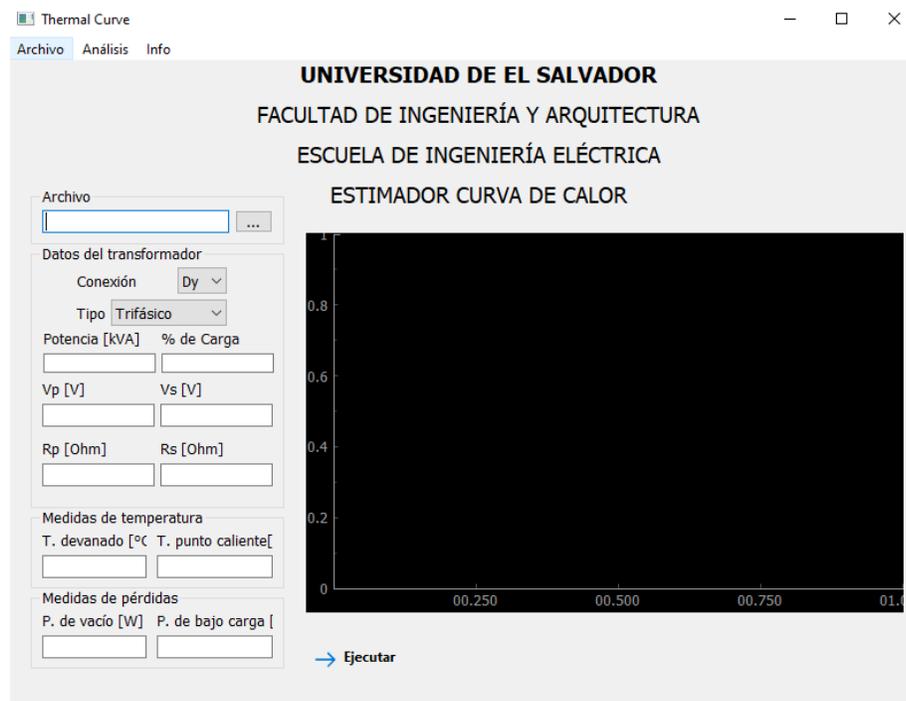


Ilustración 8. Prototipo 2 desarrollo para esta investigación.

4.6 Finalización e implementación de termal curve (instrumento virtual).

Luego de dos versiones, cada una superior a su antecesor, llega el momento de hacer una versión optimizada y completamente funcional del instrumento. Es decir que no dependa de un entorno de desarrollado para ser ejecuto, sino que, pueda usarse directamente en cualquier computadora con un sistema operativo Windows vista o superior.

4.6.1 Flujograma del algoritmo de la herramienta virtual thermal curve.

Dadas las condiciones mínimas necesarias de los datos que se necesitan para poder ejecutar el estándar, se realiza un diagrama de flujo final que representa la manera de calcular la curva de temperatura del transformador al cual se le ha aplicado el análisis armónico con el analizador. El flujograma es el siguiente:

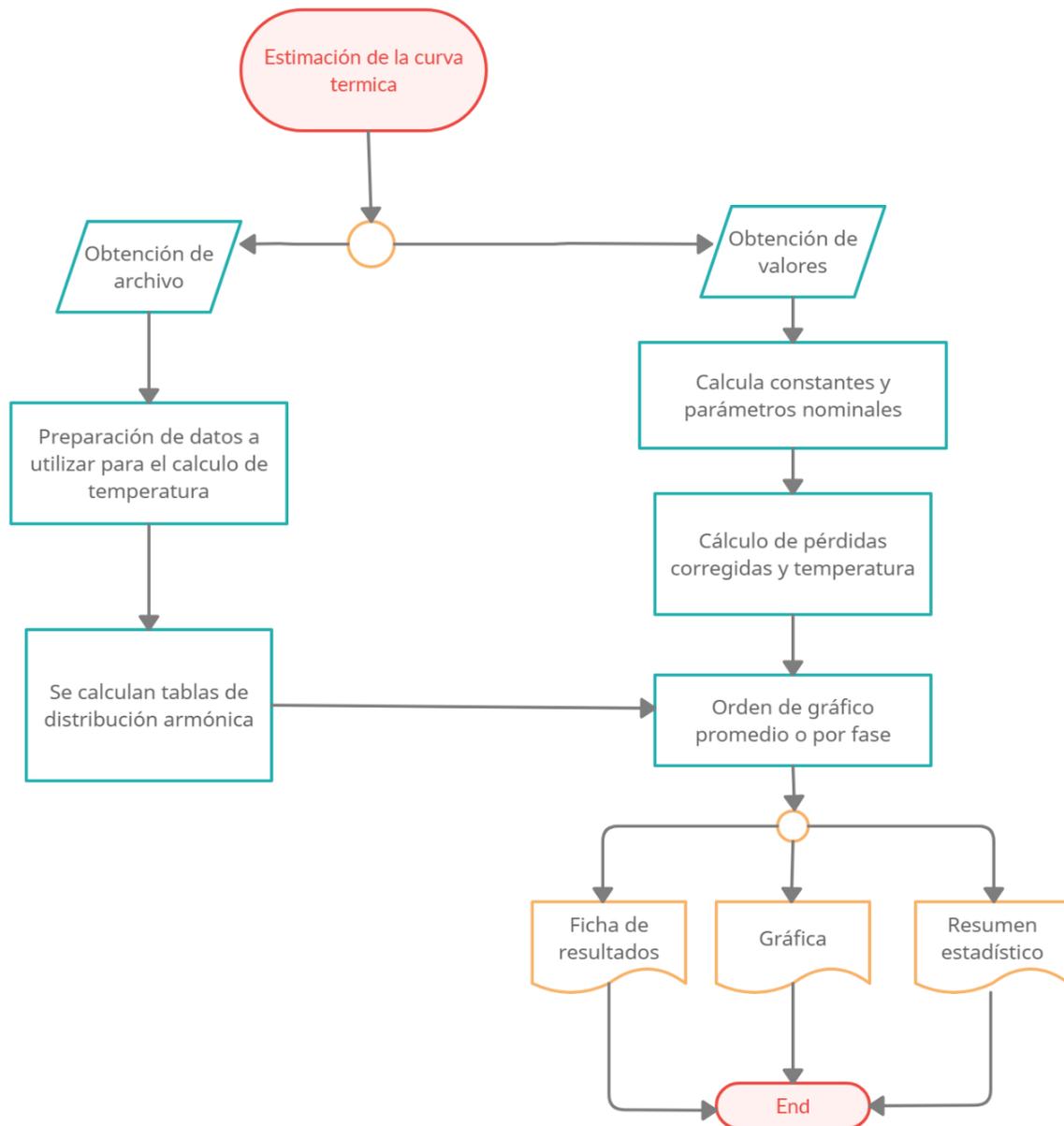


Ilustración 9 Flujograma abstracto de la versión final de Thermal Curve (prototipo 3)

Aplicando entonces este flujograma Se procede a la lógica de programación final, el código del programa final estará disponible en la versión completa de este documento. Para que el lector pueda tener una idea rápida de la secuencia de clases y sus respectivas funciones y/o herencias de clases de librerías oficiales de Python, se ha generado el siguiente diagrama de clases con la ejecución de rutina de la herramienta

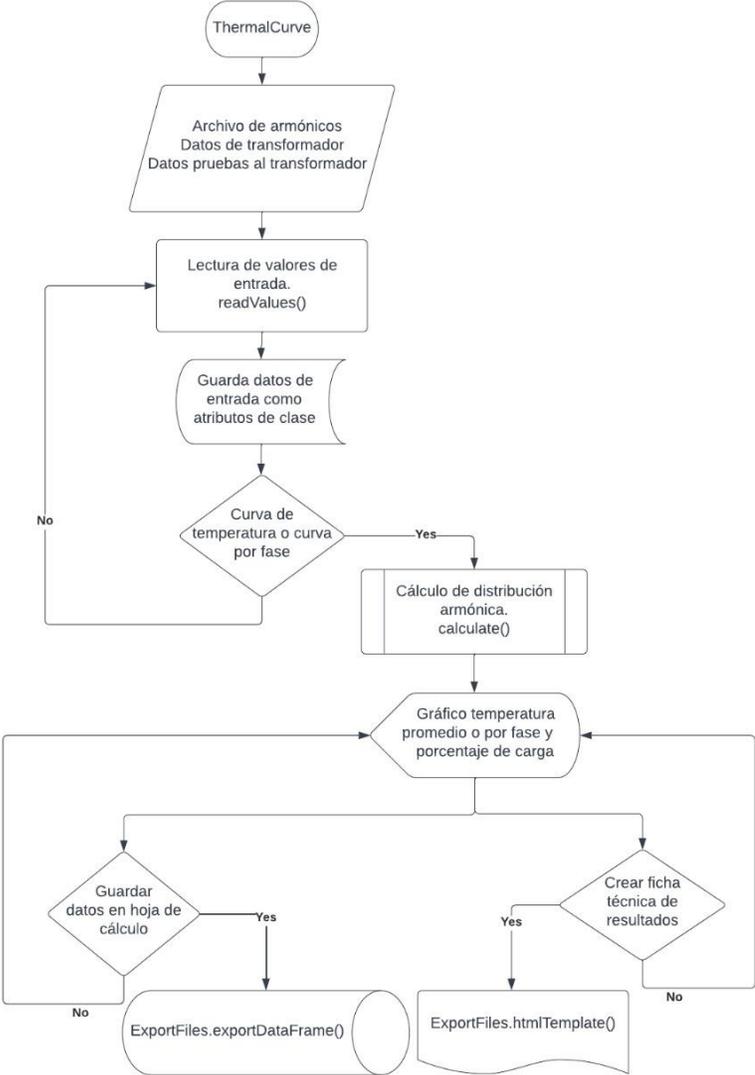


Ilustración 10 Flujograma de ejecución de clases y funciones de herramienta virtual thermal curve

Siendo la función de la clase ThermalCurve la responsable de realizar el cálculo de la distribución armónica como sigue en el siguiente flujo grama:

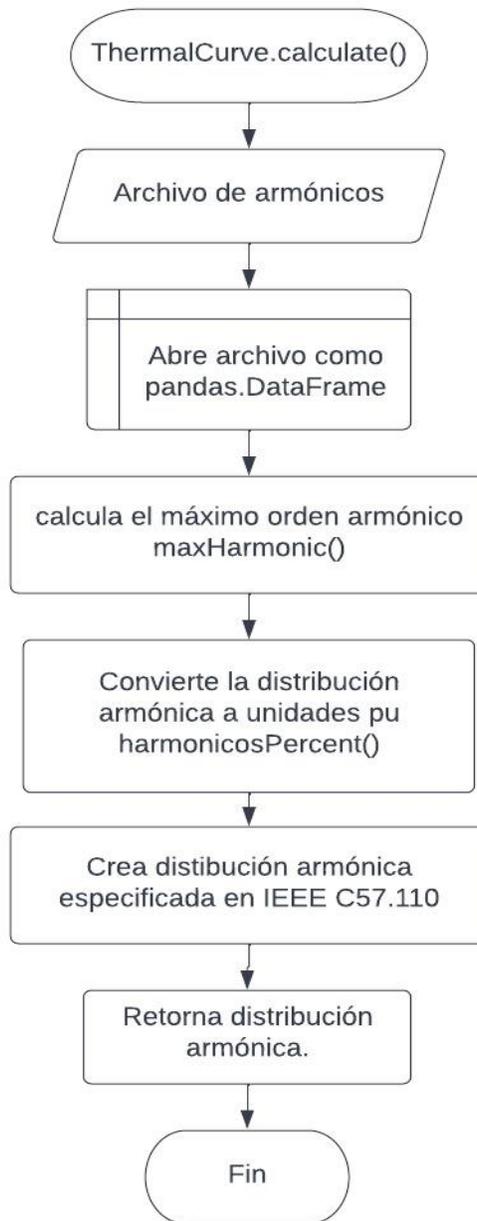


Ilustración 11 Flujo grama la función `thermalcurve.calculate`

4.6.2 Clases y funciones primordiales de termal curve de termal curve.

Para poder ejecutar de manera correcta y lógica las ecuaciones planteadas en el ejemplo práctico del punto 4.1 se han desarrollado las siguientes clases y funciones que permiten implementar el flujo grama abstracto de punto 6.4.1 y flujograma de código de en el mismo punto. Tomar en cuenta que el programa tiene muchas funciones más, pero estas solamente se utilizan para calculo secundarios, generar GUI, entre otros. Para efectos prácticos el código se muestra en el documento final. Para aplicar buenas prácticas [13] programación el 99% de las clases y sus funciones están escritas en inglés, pues con esto las revisiones y correcciones son más fluidas y ordenadas

4.6.2.1 Clase CircutorAnalysis.

Esta clase contiene el análisis del archivo texto generado en el programa PowerVision de CIRCUTOR, el cual contiene la información de las corrientes armónicas por fase y la potencia aparente captadas por el analizador de redes. Genera un nuevo conjunto de datos para ser analizado para la obtención de temperaturas.

4.6.2.2 harmonicDistribution ().

Esta función realiza el cálculo de la distribución armónica para cada medición y copia la potencia aparente al nuevo conjunto de datos generado.

4.6.2.3 harmonicsPercent ().

Convierte el porcentaje armónico a proporción. Realiza la división por 100.

4.6.2.4 Clase ThermalCurve ().

Se realiza el cálculo de temperatura, siguiendo el procedimiento de IEEE C57.100. Considerar que en IEEE C57.100 se calcula una tabla para una única medición y en este proyecto se realiza el cálculo de esta tabla para cada una de las mediciones hechas por el analizador de redes; es decir, se realiza una tabla similar a la siguiente para cada una de las mediciones. Tomar en cuenta que para la distribución armónica se obtiene únicamente las sumatorias necesarias y no la tabla en sí.

Para las pérdidas se obtienen todas las siguientes funciones de la clase Thermalcurve ():

4.6.2.5 temperatureStimator ().

Realiza la estimación de la distribución armónica, pérdidas y temperaturas establecidas en IEEE C57.100 para cada una de las mediciones a partir de los parámetros del transformador establecidos en los datos de entrada del programa y la información armónica del analizador de redes de CIRCUTOR.

4.6.2.6 eddyLossPercent ().

Retorna porcentaje de pérdidas atribuidos a las corrientes parásitas o corrientes de Eddy según tabla 14 de IEEE C57.100

V. GUÍA DE USO DE INSTRUMENTO VIRTUAL THERMAL CURVE

Para poder operar el instrumento termal curve se ha desarrollado la siguiente guía. Con esto se proporciona los conocimientos necesarios para ejecutar un cálculo a través de la aplicación. La herramienta está pensada para que puedan ejecutarse por técnicos electricistas de 4 categoría o superior, Ingenieros destacados en el área de potencia o distribución eléctrica.

5.1 Obtención de parámetros eléctricos.

Mediante el software PowerVision CIRCUTOR se debe cargar el archivo STD que genera el Analizador de Redes.

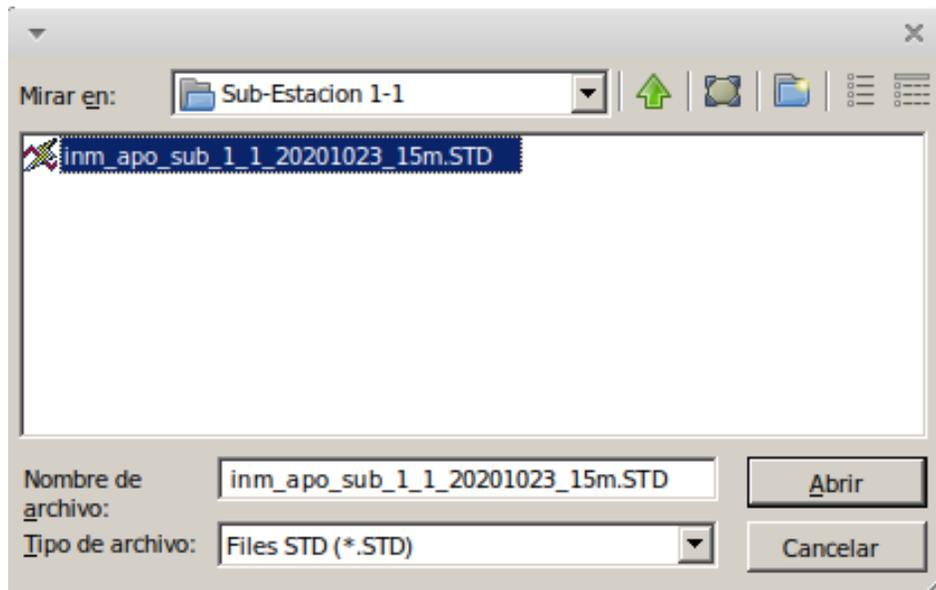


Ilustración 12 Carga de archivos Tipo STD en CIRCUTOR POWER VISION

Al cargarlo, se establece en el programa el uso de Listas

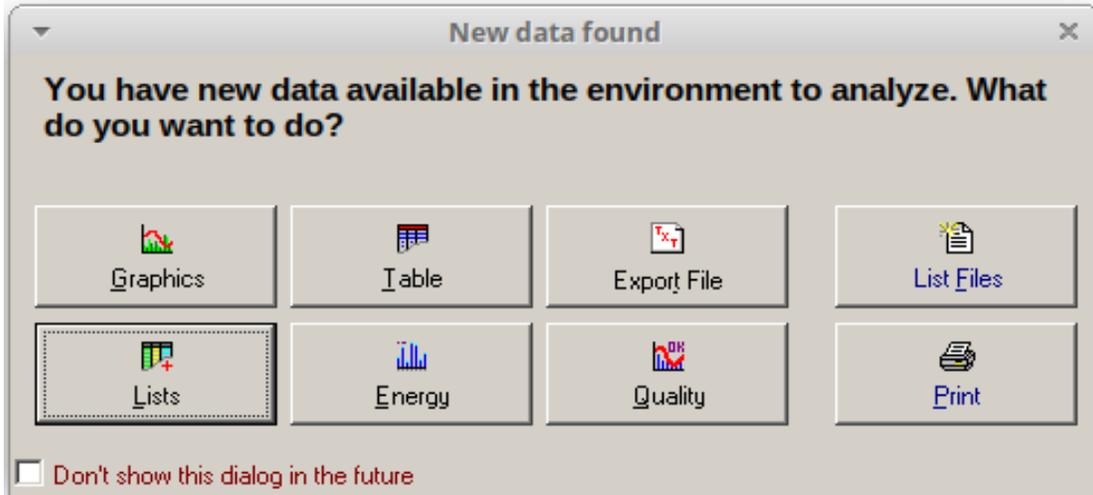


Ilustración 13 Selección de usos de listas (List).

En la siguiente ventana se seleccionan las magnitudes que el analizador ha obtenido en la medición, programada por el encargado, por lo que se debe estar seguro que el archivo STD contiene las mediciones armónicas y de potencia.

Las magnitudes de interés para el análisis de Temperatura son:

- *Harmonics IL1, IL2 e IL3*: contiene la información porcentual de las corrientes armónicas medidas por el analizador en referencia a la corriente armónica fundamental; se deben seleccionar todos los órdenes armónicos de interés. (recomendable mayor a 25)

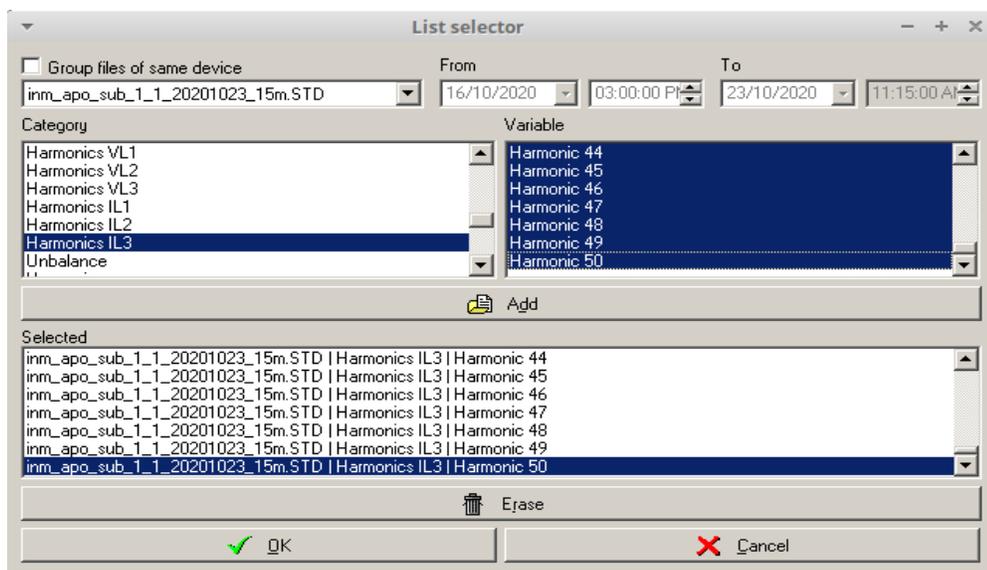


Ilustración 14 Filtro de los datos que se utilizaran para el instrumento

- Apparent Power: contiene la potencia aparente consumida registrada por el analizador de redes; se debe seleccionar la variable Triphasic.

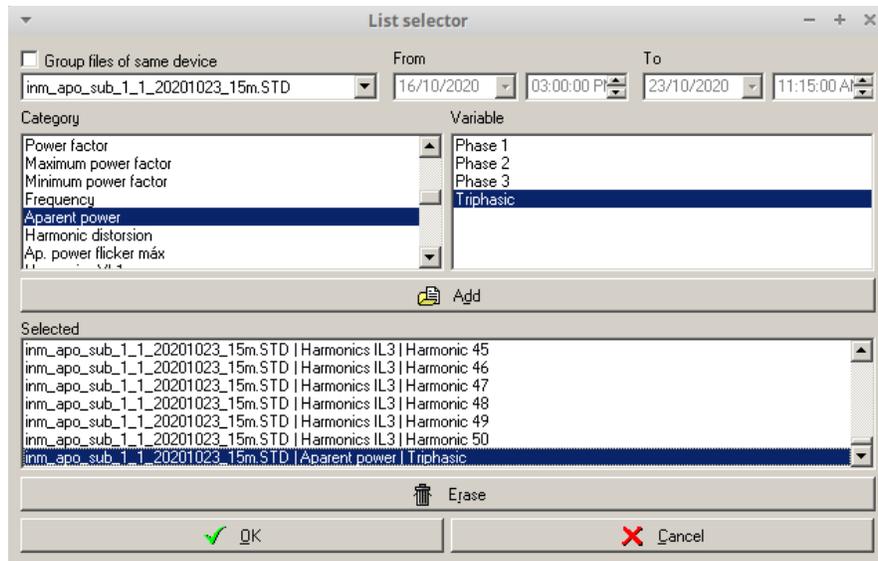


Ilustración 15 Filtro de los datos que se utilizaran para el instrumento

Una vez cargados, se abrirá la ventana de diálogo para la creación del archivo texto, donde se guardará y el nombre especificado.

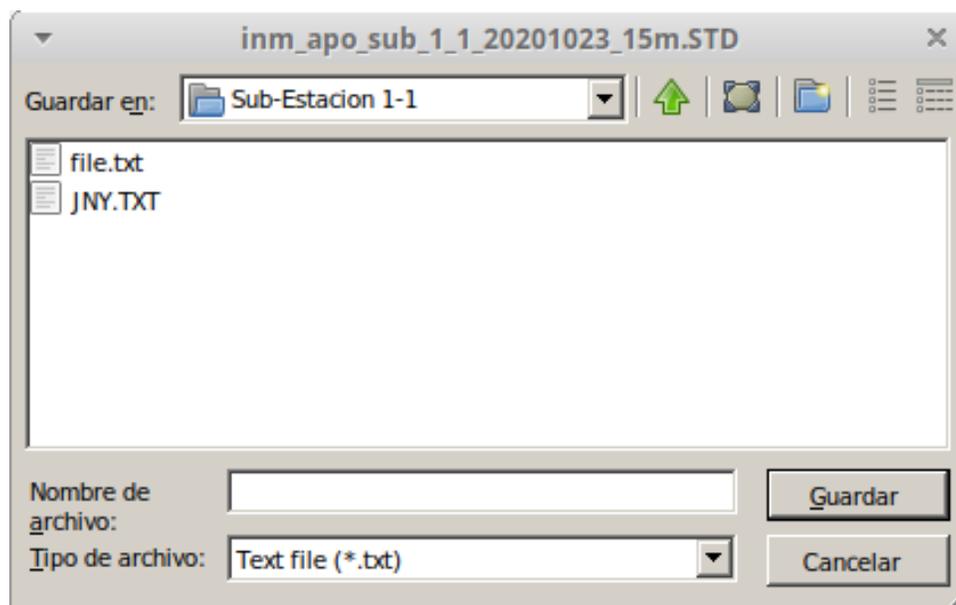


Ilustración 16 Creación de archivo texto

Por último, se solicita seleccionar los delimitadores del archivo, tanto para las columnas como para la información de fechas.

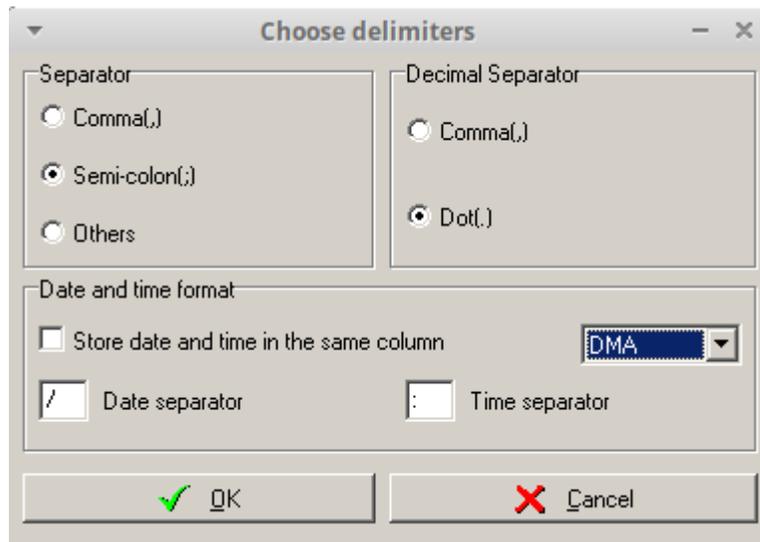


Ilustración 17 Delimitadores para generar archivo .csv

Se debe establecer:

- Separador: punto y coma (;)
- Separador de fecha: diagonal (/)
- separador de tiempo: dos puntos (:)
- formato de fecha: DMA (Dia, Mes, Año)
- Deseleccionada la casilla de guardar fecha y tiempo en la misma casilla, por lo que se generarán dos columnas para esta información.

Una vez seleccionada, se crea el archivo listo para calcular la temperatura con el programa desarrollado.

5.2 Resultado final de la herramienta thermal curve.

En la siguiente ilustración, se muestra el instrumento thermal curve en ejecución y totalmente funcional. Los datos que corre son datos utilizados de prueba.

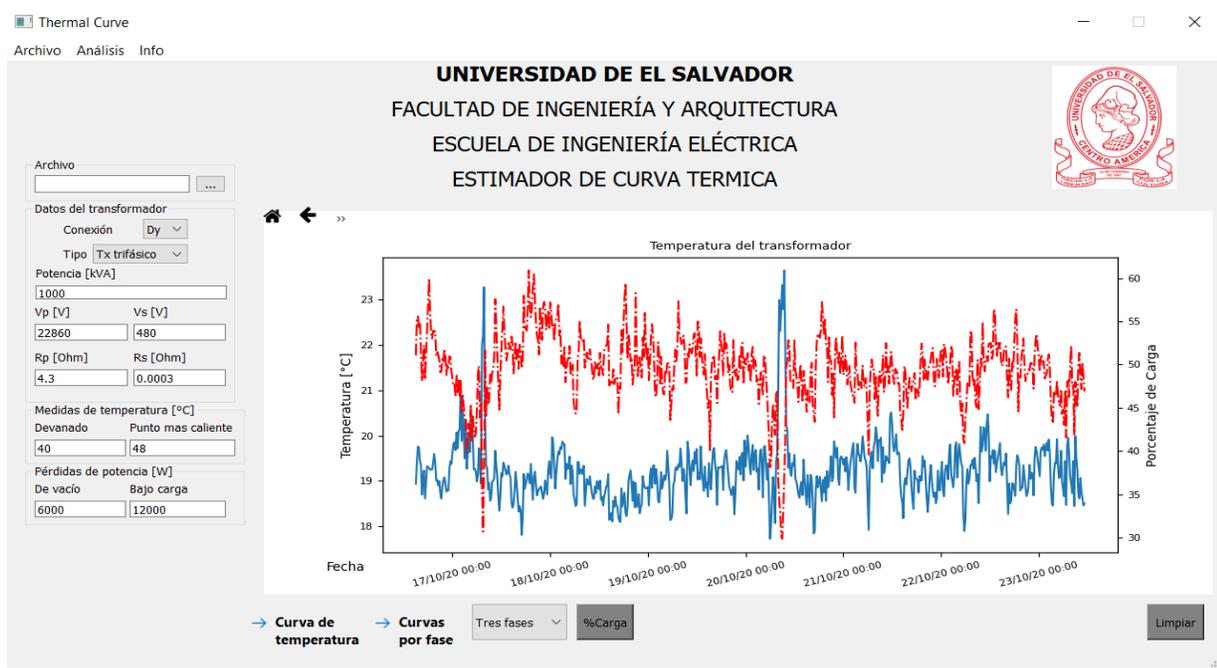


Ilustración 18 Resultado Final de herramienta Thermal curve

5.3 Características de la herramienta thermal curve.

Una vez desarrollada y optimizada la aplicación se procede a explicar cada una de sus características y funcionalidades.

5.3.1 Requerimientos mínimos de la computadora.

El instrumento desarrollado está muy optimizado por lo que consume muy pocos recursos, los requisitos mínimos son:

- *Sistema operativo: Microsoft Windows 7,8,10 u 11*
- *Memoria RAM: 2Gb*
- *Procesador: Procesador a 1 GHz, se recomienda Intel Celeron de 3 generación o superior*

- Espacio en disco: 150,5 MB
- CIRCUTOR power visión instalado.

5.3.2 Componentes de thermal curve.

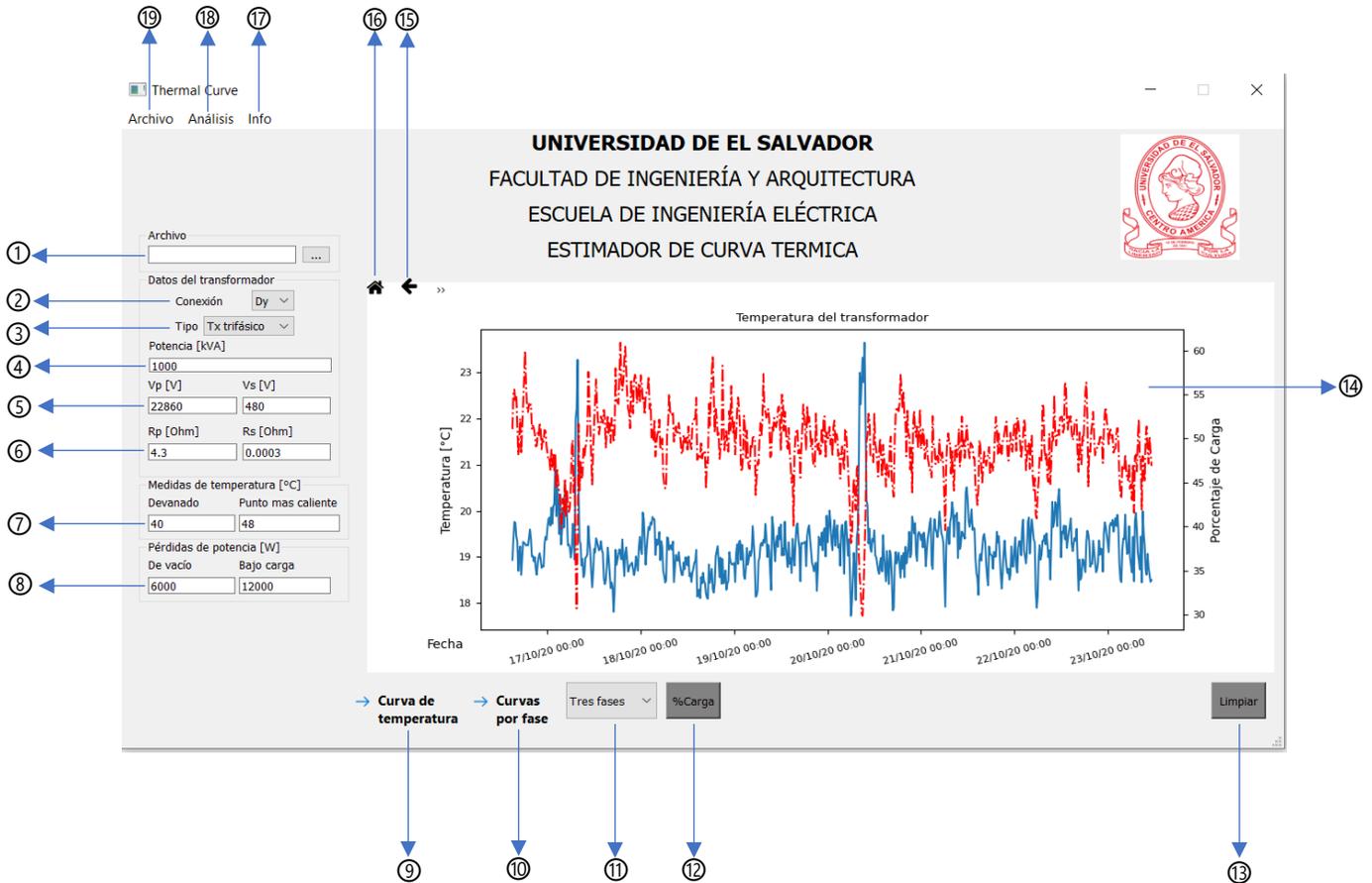


Ilustración 19 Componentes de la herramienta Thermal curve

- 1) Carga de archivo csv extraído de power visión CIRCUTOR.
- 2) Selección Tipo de conexión del transformador trifásico.
- 3) Selección de tipo de transformador (arreglo de transformadores monofásico o transformador trifásico).
- 4) Ingreso de potencia del transformador (en KVA).
- 5) Ingreso de Tensión del transformador en secundario (HV) o en primario (LV) (en V).
- 6) Resistencias En los devanados (HV Y LV) (en Ω).

- ⑦ Medidas de temperatura en devanado y en el punto más caliente. (Datos se pueden conseguir por medio de análisis termográfico o si está disponible los medidores de temperatura del transformador (en °C).
- ⑧ Perdidas de Potencia sin carga (de vacío) y bajo carga (en W).

5.3.2.2 Área graficador (del 9 al 16).

- ⑨ Botón para graficar curva de temperatura. Una vez cargados los datos se presiona y se genera la curva de temperatura en base a los mismos.
- ⑩ Botón para graficar curvas por fase. El botón anterior automáticamente genera la curva con el promedio de temperatura de las tres fases, si se desea presionando este botón se pueden graficar las fases individuales.
- ⑪ Selector de fase a graficar. Se puede seleccionar si se desea ver solo una fase de las tres fases o todas las fases al mismo tiempo.
- ⑫ Botón para graficar curva de carga. Si se desea se puede graficar la curva de carga que se genera con los datos extraídos del archivo .CSV
- ⑬ Botón limpiar. Limpia los datos de un análisis para poder cargar uno nuevo esto incluye el área de datos y los ejes de las gráficas.
- ⑭ Grafico de datos. Se presentan los resultados del grafico que se obtiene, luego del análisis del archivo .CSV consta de dos ejes cartesianos en y, uno para la temperatura(izquierda) y otro para porcentaje de carga (derecha) el eje X expresa tiempo en fecha y horas y minutos.
- ⑮ Botón retroceso. Se utiliza para regresar al grafico a un estado anterior cuando se ha hecho zoom.
- ⑯ Botón home. Se utiliza para regresar el grafico a su punto original, luego de haber hecho zoom, no importa la cantidad, regresara al grafico inicial.

5.3.2.3 Área Herramientas (del 17 al 19).

- ⑰ Botón info. Contiene el sub menú datos que carga el navegador por defecto y da una guía del uso del estimado de curva térmica y sub menú about habla acerca de autores y versión.
- ⑱ Botón análisis contiene el sub menú resumen que muestra los datos condensados del análisis de manera rápida. El sub menú ficha de resultados que carga una hoja en el navegador para poder ver los resultados del análisis y gráficas y submenús exportar datos que exporta a un archivo .csv toda la data generada en bruto para el análisis térmico.
- ⑲ Botón archivo. Contiene el sub menú en donde se puede cargar el archivo .csv que se usara para el análisis y el sub menú cerrar que cierra correctamente el programa.

VI. PRUEBAS REALIZADAS Y RESULTADOS OBTENIDOS CON EL INSTRUMENTO VIRTUAL THERMAL CURVE

6.1 Parámetros eléctricos de sujetos de prueba.

Para corroborar el correcto funcionamiento de Thermalcurve, se realizaron múltiples pruebas, sin embargo, solo se lograron obtener dos sujetos de prueba que cumplieran con todos los requisitos y parámetros previos que del estándar Std IEEE C57.110, requiere para el posterior análisis de temperatura.

6.2 Sujeto de prueba 1 HANES –TIPO PADMOUNTED 1000KVA [14].

Marca del transformador	HOWARD
Tipo	Pad mounted
Potencia	1000 kVA
Tensión en primario	22860 V
Tensión en secundario	277/480 V
Número de serie	2606143301
Fluido aislante	Aceite dieléctrico
Fecha muestra	Octubre 2020

Ilustración 20 Características técnicas de sujeto de prueba 1

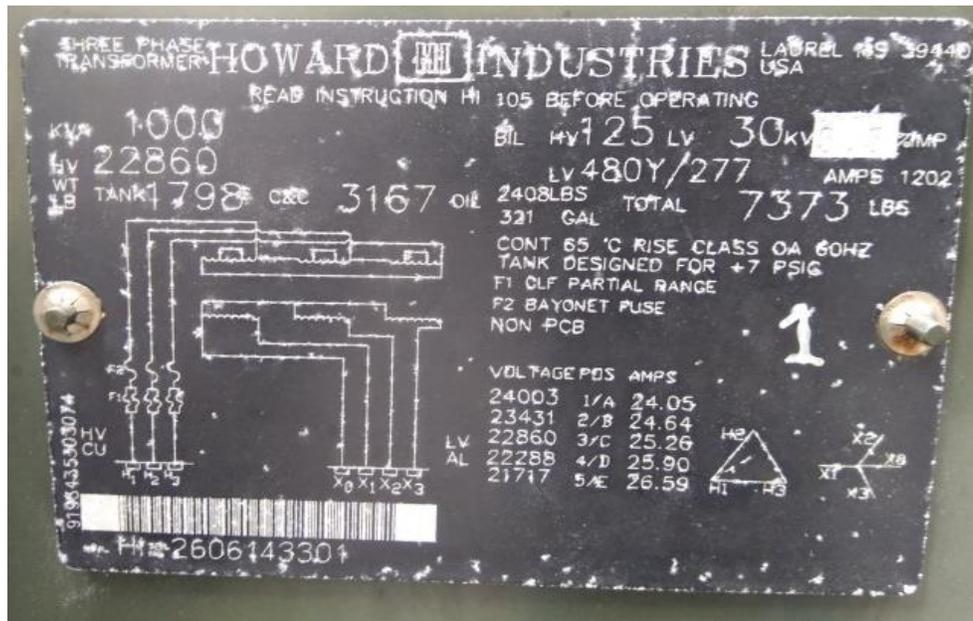


Ilustración 21 Placa con características técnicas de sujeto de prueba 1 Fuente; Cortesía GRUPO PELSA

6.2.1 Rango de tensión en LV, para el transformador, tomada desde reporte de pruebas con base a CICUTOR. [14].

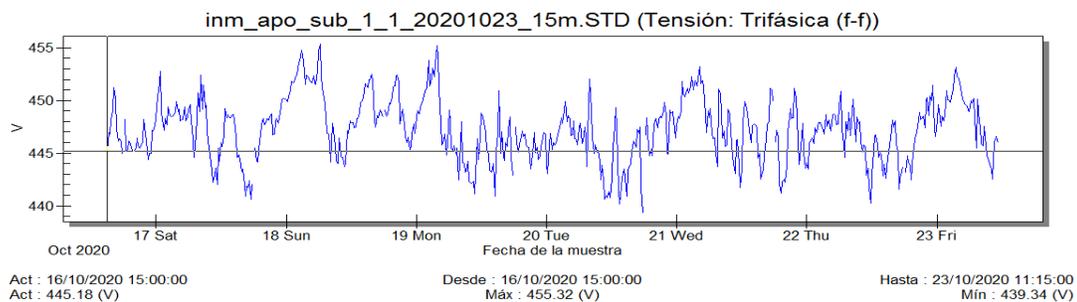


Ilustración 22 Rango de tensión en LV, para el transformador

Medición	Valor (v)
Tensión máxima	455.32
Tensión mínima	439.34

Ilustración 23 Tabla de resultados del rango de tensión.

6.2.2 Perfil de corrientes de carga en la subestación, de acuerdo a datos del analizador y el programa CIRCUTOR. [14].

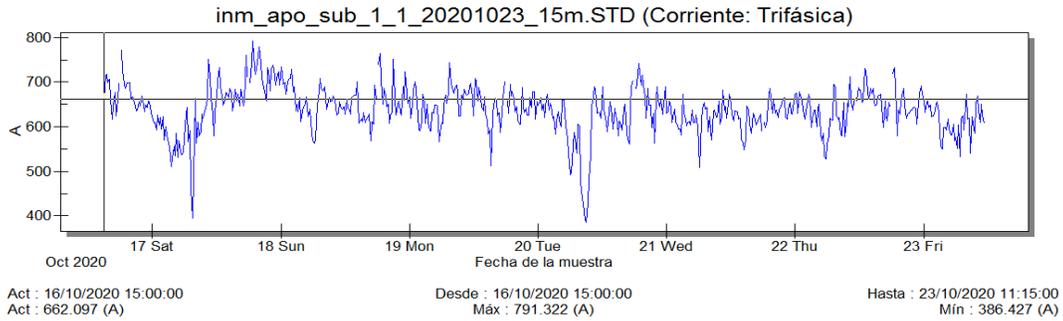


Ilustración 24 Perfil de corrientes de carga en la subestación.

	Corrientes de línea máxima		Corrientes de línea mínima	
	Corriente (A)	Corriente promedio	Corriente (A)	Corriente promedio
Línea 1	821.97	769.57	372.88	337.52
Línea 2	761.06		327.69	
Línea 3	725.67		312	

Tabla 13 Corrientes de línea mínima y máxima.

6.2.3 Para los datos de potencia activa se tiene las siguientes variaciones de la potencia: [14].

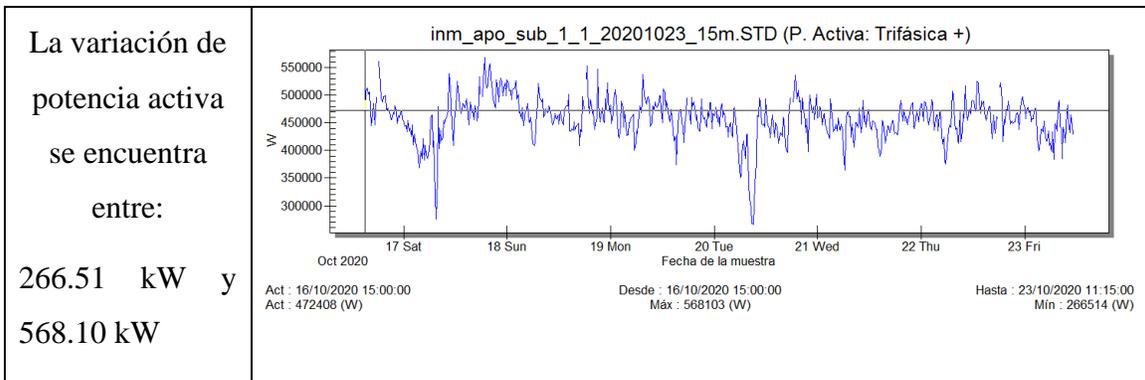


Ilustración 25 Variaciones de la potencia

Otro dato que es importante es determinar la carga de potencia aparente que tiene un transformador, siempre obtenida desde las mediciones hechas por el analizador de red; en este caso la subestación, con el fin de poder determinar por medio del cálculo el porcentaje de utilización del transformador.

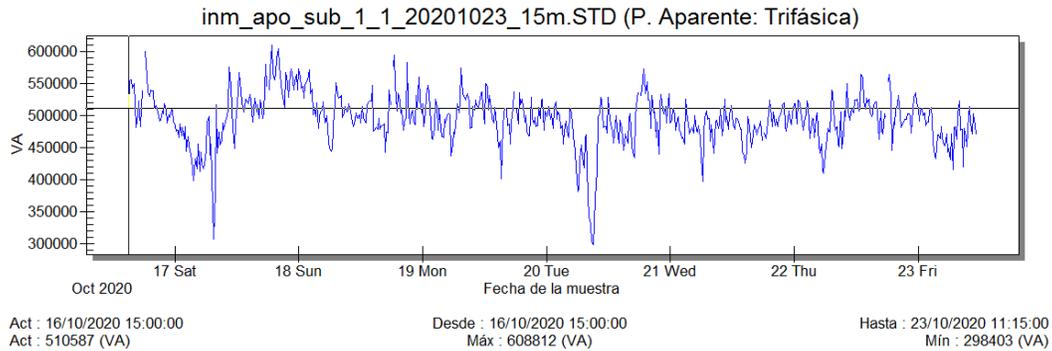


Ilustración 26 Potencia aparente del sujeto de prueba 1.

El valor de la potencia máximo registrado por el analizador, fue de 608.812 kVA; con este dato se dividirá entre la capacidad nominal de la subestación que es de 1000kVA. Este valor ayudara para posteriormente agregarlo en la herramienta, como porcentaje de carga del transformador. Aunque este dato se extrae directamente de la “data” procesada por CIRCUTOR.

$$\% \text{ Utilización de la subestación: } \frac{608.812kVA}{1000kVA} * 100$$

$$\% \text{ Utilización de la subestación: } 60.88\%$$

6.2.4 Datos son proporcionados por el test y las hojas del fabricante utilizadas en prueba: [14].

Parámetros	Valores	Parámetros	Valores
Rp	5.23Ω	Rs	0.04290 Ω
Temperatura del devanado (°C)	42	Punto más caliente (°C)	55
Perdidas de potencia en vacío (W)	1835.62	Perdidas bajo carga (W)	14300.6

Tabla 14 Parámetros necesarios para la ejecución de la prueba en thermal curve para sujeto de prueba 1.

6.2.5 Resultado de estimación de la curva térmica.

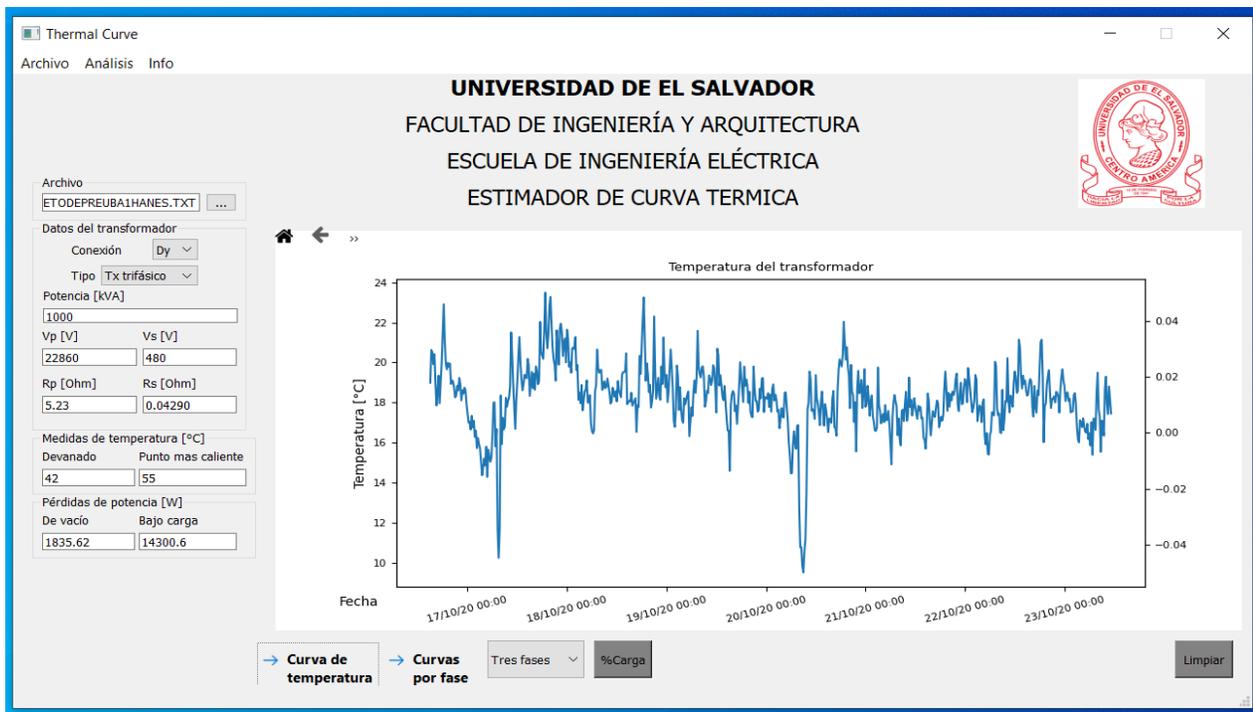


Ilustración 27 Resultados de la curva térmica para sujeto de prueba 1

6.2.6 Estimación con la el porcentaje de carga sobre la cura térmica.

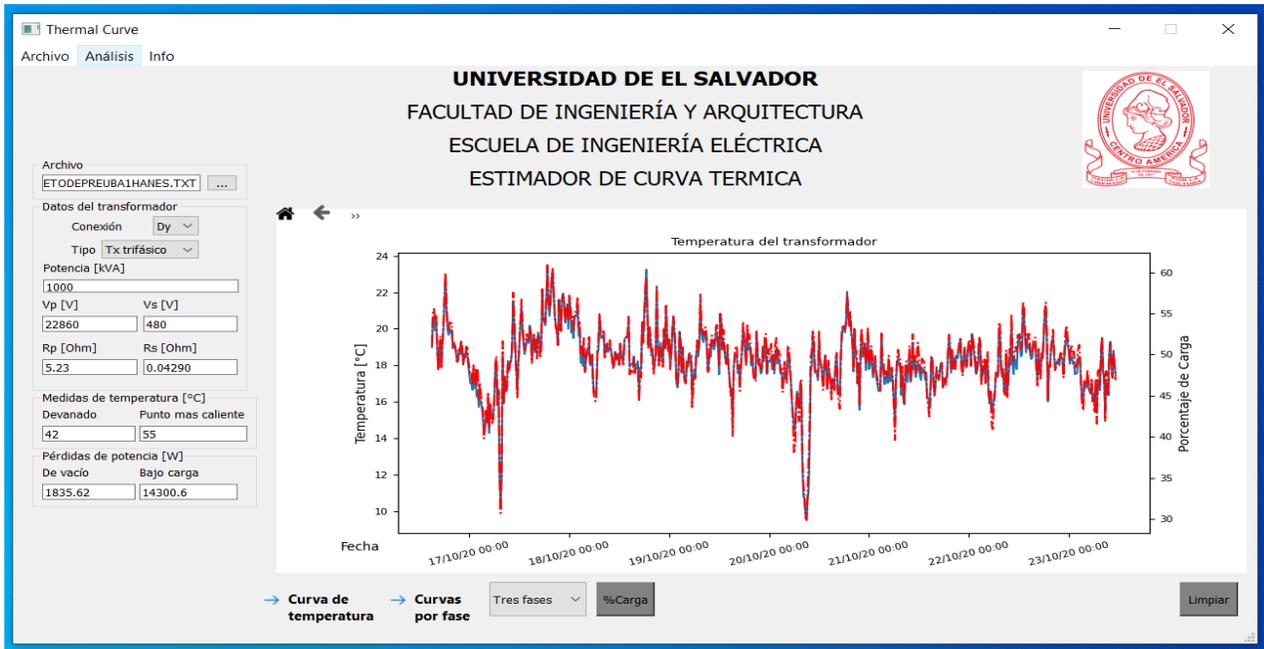


Ilustración 28 Resultado de curva térmica y curva de carga para sujeto de prueba 1

6.2.7 Sujeto de prueba 2 HILANDERIAS – TIPO PADMOUNTED 2000KVA [15].

Marcar del transformador	Westinghouse
Tipo	Subestación
Potencia	2000 kVA
Voltaje	22,860/550V
Número de serie	SBT7758-0101
Fluido aislante	Aceite dieléctrico
Fecha de muestreo	Noviembre 2021

Tabla 15 Características técnicas de sujeto de prueba 2

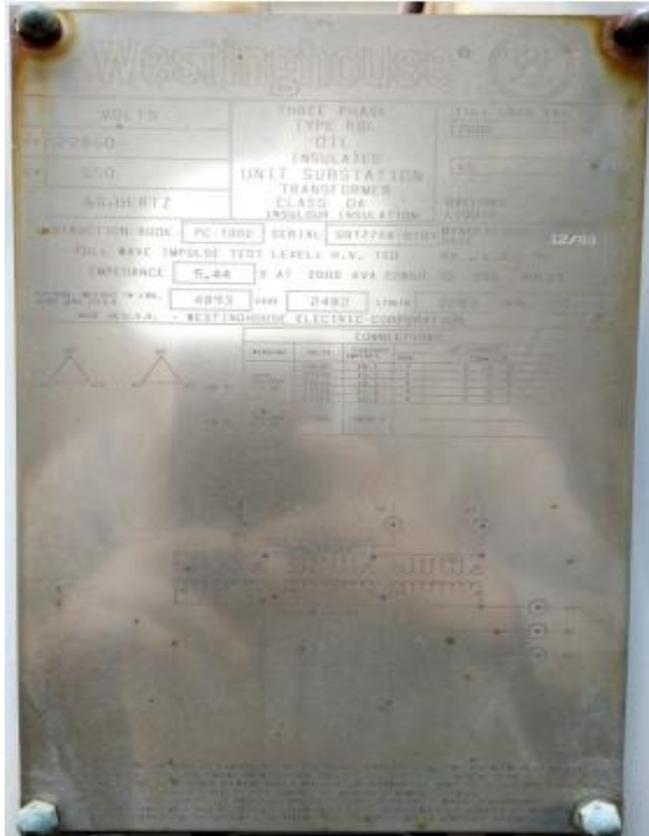


Ilustración 29 Placa con características técnicas de sujeto de prueba 2. Fuente; Cortesía GRUPO PELSA

6.2.8 Rango de tensión en LV, para el transformador, tomada desde reporte de pruebas con base a CIRCUTOR.

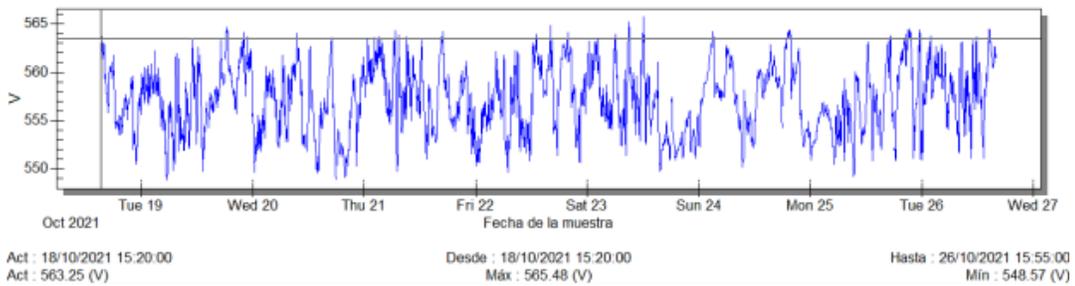


Ilustración 30 Rango de tensión en LV, para el transformador sujeto de prueba 2

Medición	Valor (v)
Tensión máxima	564.48
Tensión mínima	548.57

Tabla 16 Resultados del rango de tensión.

6.2.9 Perfil de corrientes de carga en la subestación, de acuerdo a datos del analizador y el programa CIRCUTOR. [15].

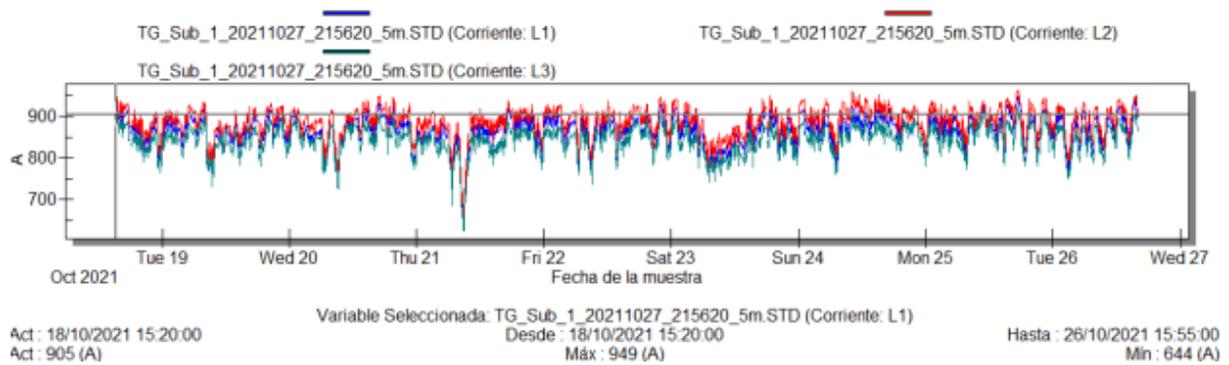


Ilustración 31 Perfil de corrientes de carga en la subestación de sujeto de prueba 2

	Corrientes de línea máxima		Corrientes de línea mínima	
	Corriente (A)	Corriente promedio	Corriente (A)	Corriente promedio
Línea 1	949	943.33	644	642.33
Línea 2	961		659	
Línea 3	920		624	

Tabla 17 Corriente de línea máxima y mínima para sujeto de prueba 2.

6.2.10 Para los datos de potencia activa se tiene las siguientes variaciones de la potencia: [15].

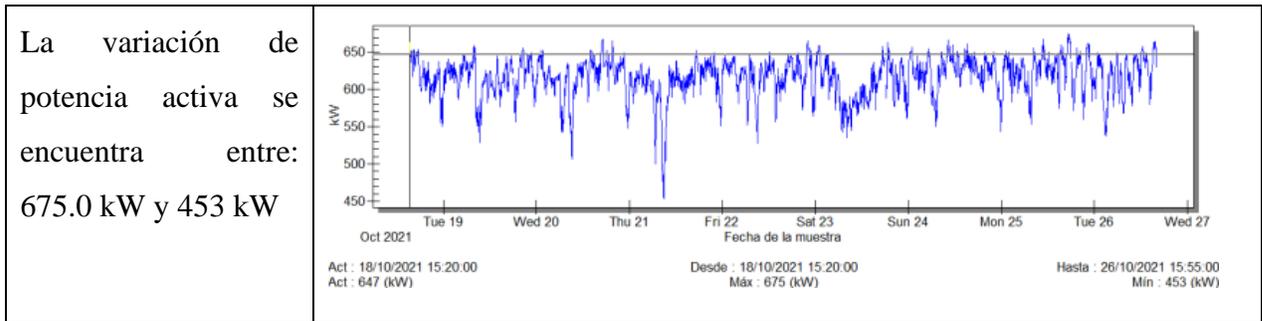


Ilustración 32 siguientes variaciones de la potencia para sujeto de prueba 2

Otro dato que es importante es determinar la carga de potencia aparente que tiene un transformador, siempre obtenida desde las mediciones hechas por el analizador de red; en este caso la subestación, con el fin de poder determinar por medio del cálculo el porcentaje de utilización del transformador.

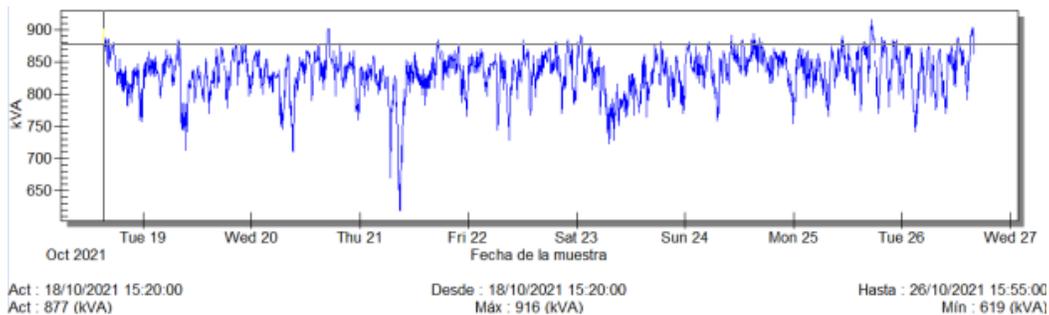


Ilustración 33 Curva de carga de la potencia aparente, sujeto de prueba 2

El valor de la potencia máximo registrado por el analizador, fue de 916kVA; con este dato se dividirá entre la capacidad nominal de la subestación que es de 2000kVA. Este valor ayudara para posteriormente agregarlo en la herramienta, como porcentaje de carga del transformador. Aunque este dato se extrae directamente de la “data” procesada por CIRCUTOR.

$$\% \text{ Utilización de la subestación: } \frac{916kVA}{2000kVA} * 100$$

$$\% \text{ Utilización de la subestación: } 45.8\%$$

6.2.11 Datos son proporcionados por el test y las hojas del fabricante utilizadas en el mismo test:
[15].

Parámetros	Valores	Parámetros	Valores
Rp	4.6Ω	Rs	0.00098 Ω
Temperatura del devanado (°C)	33	Punto más caliente (°C)	60
Perdidas de potencia en vacío (W)	9227.21	Perdidas bajo carga (W)	20254.20

Tabla 18 Parámetros necesarios para la ejecución de la prueba en thermal curve para sujeto de prueba 2

6.2.12 Resultado de estimación de la curva térmica.

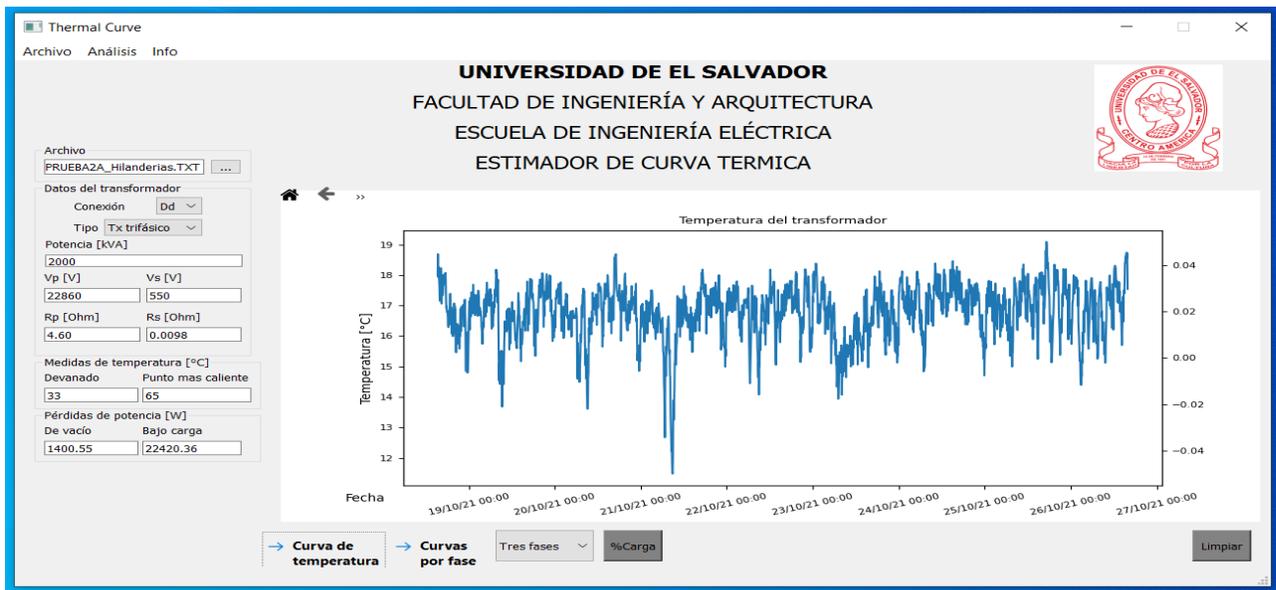


Ilustración 34 Resultados de la curva térmica para sujeto de prueba 2

6.2.13 Estimación con el porcentaje de carga sobre la curva térmica.

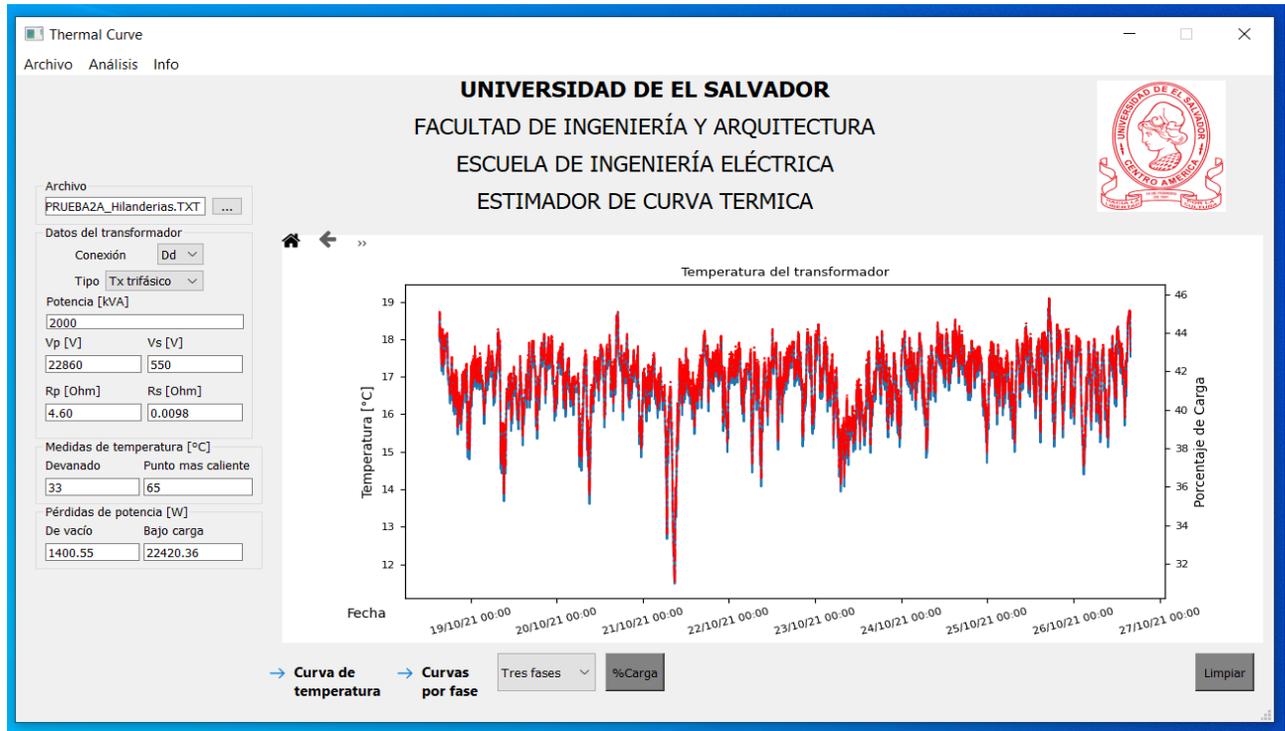


Ilustración 35 Resultado de la curva térmica y curva de carga para sujeto de prueba 2.

Se observa entonces el resultado final de la herramienta junto con todas sus funcionalidades. El instrumento según las pruebas realizadas y explicadas a detalle en los puntos pasados, muestran que la manera de trabajar del instrumento es rápida, ordenada e intuitiva, con lo que da paso a poder desarrollar más este software en futuros trabajos de tesis. El siguiente paso a seguir será generar un prototipo de transformador y hacer mediciones reales de temperatura, luego realizar un test certificado de pruebas o en su defecto emular uno e ingresar todos los datos obtenidos para así poder verificar la precisión que tiene el instrumento.

CONCLUSIONES

- La norma IEEE Std C57.110 da lineamientos que van desde lo abstracto hasta lo específico para poder medir la temperatura de un transformador en el punto más caliente, ya sea de potencia o distribución. Con el análisis planteado se ha podido generar un instrumento que sistematice el procedimiento de la norma. La funcionalidad de la aplicación puede ser verificada reproduciendo el ejemplo planteado cuando se tiene datos de reporte certificado y un análisis de armónicos de la red eléctrica (este bajo ciertas condiciones). Esta verificación fue ejecutada con éxito por lo que se tiene un instrumento virtual para trazar la curva térmica en transformadores funcional.
- Cuando se tiene un aumento de cargas no lineales en los transformadores, las temperaturas aumentan, en muchos casos, este aumento de temperatura es sustancial y trae repercusiones muy negativas en la vida útil del transformador. Se puede concluir entonces, que tener un instrumento virtual que pueda mostrar la temperatura a partir de datos oficiales (ya sea que la fábrica los entrega o se realizan las pruebas de norma para conseguirlos) puede ayudar a predecir fallas en los transformadores o tomar decisiones con respecto a cambios de los mismos.
- La herramienta desarrollada es una mejora sustancial de las versiones previas que habían sido presentadas a lo largo del historial de trabajos de investigación del estándar IEEE C57, precedentes a este; agregando un mejor manejo de los recursos referente al procesamiento de datos y cálculos de las computadoras actuales, corrección de procedimientos matemáticos aplicados desde la interpretación del estándar, y una programación en un lenguaje orientado a objetos más liviano con mejores usos de clases, y que actualmente es el lenguaje más utilizado en el mundo según IEEE Spectrum [11] (Python) y sin enfoque a la programación lineal, que era un punto desfavorable en la versión previa limitándola en eficiencia.

- La estimación de la curva térmica de un transformador es base para las proyecciones de vida de los aislamientos de los devanados, donde principalmente ocurre el cambio de temperatura en los momento que el transformador se ve sometido a mayores cargas, en particular, a las de tipo no lineal, que, actualmente son mayormente usadas por los equipos electrónicos, dando inicio a perdidas armónicas dentro del arrollamiento del devanado y demás perdidas por la dispersión de los campos entre el material del núcleo. Esta proyección de la vida útil del aislamiento es el siguiente paso dentro de la serie de estándares IEEE C57 de prueba de transformadores, para estimación de envejecimiento del aislamiento eléctrico de los devanados.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] E. Miguel, «ElectronicaUnicrom,» 2018. [En línea]. Available: <https://www.fundacionendesa.org/es/educacion/endesa-educa/recursos/corrientes-alternas-con-un-transformador-electrico>. [Último acceso: 6 marzo 2022].
- [2] L. R. P. S. William Martinez, Evaluación térmica en transformadores de potencia, cargabilidad y efectos en la vida del sistema de aislamiento., San Salvador: Universidad de El Salvador, 2014, p. 87.
- [3] The Institute of Electrical and Electronics Engineers, IEEE Std C57.12.90-2015 Standard Test Code for Liquid-Immersed Distribution, Power, and Regulating Transformers, Nueva york: IEEE Power and Energy Society, 2016.
- [4] The Institute of Electrical and Electronics Engineers, IEEE Std C57.110-2018 IEEE Recommended Practice for Establishing Liquid Immersed and Dry-Type Power and Distribution Transformer Capability when Supplying Nonsinusoidal Load Currents, I. S. Board, Ed., Nueva York, 2018.
- [5] CIRCUTOR, SA, «Técnicas de compensación y filtrado de perturbaciones armónicas,» Enero 2015. [En línea]. Available: <http://circuitor.es/es/formacion/armonicos-electricos>. [Último acceso: 27 febrero 2022].
- [6] Institute of Electrical and Electronics Engineers, C57.12.91-2020 IEEE Standard Test Code for Dry-Type Distribution and Power Transformers, Nueva York: IEEE, 2020.
- [7] International Business Machines.(IBM), «¿Qué es el desarrollo de software?,» International Business Machines, 16 enero 2021. [En línea]. Available: <https://www.ibm.com/es-es/topics/software-development#1309741>. [Último acceso: 6 marzo 2022].

- [8] Microsoft Corporation, «Rapid application development (RAD) for beginners,» Microsoft Corporation, 1 enero 2022. [En línea]. Available: <https://powerapps.microsoft.com/es-es/rapid-application-development-rad/>. [Último acceso: 6 marzo 2022].
- [9] Grupo ORS, Consultores electricos especializados., «¿Qué es un analizador de redes eléctricas?,» Grupo ORS, 2020 diciembre 23. [En línea]. Available: <https://grupoor.com.mx/2020/08/19/que-es-un-analizador-de-redes-electricas/#ORS&>. [Último acceso: 6 marzo 2022].
- [10] A. O. PEDRO ALFONSO, DESARROLLO DE UN INSTRUMENTO VIRTUAL PARA VISUALIZAR LA CURVA TÉRMICA DE UN TRANSFORMADOR DE POTENCIA EN SERVICIO, San Salvador: Universidad de El Salvador, 2020.
- [11] S. CASS, «The Top Programming Languages 2019 Python remains the big kahuna, but specialist languages hold their own,» The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., 6 septiembre 2019. [En línea]. Available: <https://spectrum.ieee.org/the-top-programming-languages-2019#toggle-gdpr>. [Último acceso: 6 marzo 2022].
- [12] K. K. C. F. C. B. C. M. J. A. CORTEZ MARTINEZ, PROYECTO: DESARROLLO DE UN INSTRUMENTO VIRTUAL PARA VISUALIZAR LA CURVA TÉRMICA DE UN TRANSFORMADOR DE POTENCIA EN SERVICIO., San Salvador: Universiad de El Salvador, 2021.
- [13] Mnisterio de educacion Argentino, *TUTORIALES Y BUENAS PRÁCTICAS - PYTHON*, Buenos Aires, 2018.
- [14] PROVEEDORA ELECTRICA EL SALVADOR(GRUPO PELTS), «Reporte de Medición de parámetros eléctricos para Inmobiliaria Apopa (HILCASA),» San Salvador, 2020.
- [15] PROVEEDORA ELECTRCA EL SALVADOR(GRUPO PELTS), «Reporte de Medición de parámetros eléctricos para HILANDERIA DE EXPORTACION,» San Salvador, 2021.

- [16] I. C57.12.90, IEEE Standard Test Code for Liquid-Immersed Distribution, Power, and Regulating Transformers, Estados Unidos: IEEE, 2006.
- [17] G. A. M. C. J. C. C. V. G. O. P. a. W. G. P. R. E. Fragozo Díaz, «Recomendaciones Prácticas para la Evaluación de la Carga de un Transformador Sometido a Corrientes No Sinusoidales,» *INGE CUC*, vol. 10, nº 1, p. 63–74, 22 mayo 2014.

ANEXOS

A. Código main.py

```
librerias basicas
from ast import Try
from cgitb import html
import sys
import os

import webbrowser
from matplotlib import style
#tratamiento de tablas (csv, excel, etc)
import pandas as pd
#procedar matematico
import numpy as np
#desarrollo grafico
from matplotlib.backends.backend_qt5agg import FigureCanvasQTAgg as FigureCanvas
from matplotlib.backends.backend_qt5agg import NavigationToolbar2QT as
NavigationToolbar
import matplotlib.pyplot as plt
from pyparsing import null_debug_action
#analisis datos circutor
from circutorAnalysis import CircutorHarmonicAnalysis
#interfaz grafica
from gui import * #(todas las funciones)

#formato de tiempo
from datetime import datetime

from exportFiles import exportDataFrame
## Constantes
CONNECTION_MULTIPLIER = {
    'Dy': [2/9, 2/3],
    'Dd': [2/9, 2/9],
    'Yy': [2/3, 2/3],
    'Yd': [2/3, 2/9]
}
## tipo de arreglo de trafos
TRANSFORMERTYPE_K = {
    'Tx trifásico': 1.5,
    'Banco monofásico': 1
}
#DEDINICION DE RUTA RAIZ DE LOS ARCHIVOS
def resource_path(relative_path):
    try:
        base_path = sys._MEIPASS
    except Exception:
        base_path = os.path.abspath(".")
    return os.path.join(base_path, relative_path)

DATAURL= resource_path('datos.html')
```

```

ABOUTURL=resource_path('about.html')
TEMPLATE = resource_path('template.html')
#obtencion de datos con procesamiento de los datos
class ThermalCurve(QMainWindow, Ui_MainWindow):
    def __init__(self, *args, **kwargs):
        QMainWindow.__init__(self, *args, **kwargs) #HERENCIA uI_Main
        #QtWidgets.QMdiSubWindow.__init__(self, *args, **kwargs)
        self.setupUi(self)
        self.currentDir = os.getcwd()
        self.data = pd.DataFrame()
#INTERACCIONES DE BOTONES
        self.toolButton.clicked.connect(self.openfile)
        self.commandLinkButton.clicked.connect(self.execute)
        self.commandLinkButton_2.clicked.connect(self.execute_p)
        self.pushButton.clicked.connect(self.showLoadPercent)
        self.clearButton.clicked.connect(self.clearAll)
        self.actionExportar_gr_fico.triggered.connect(self.summaryWindow)
        self.actionLoad.triggered.connect(self.openfile)
        self.actionData.triggered.connect(lambda: webbrowser.open(DATAURL,new=1))
        self.actionAbout.triggered.connect(lambda: webbrowser.open(ABOUTURL,new=1))
        self.actionExportar_datos.triggered.connect(self.exportData)
        self.actionExit.triggered.connect(lambda:self.close())

        self.actionFicha_de_resultados.triggered.connect(self.htmlTemplate)
        #self.actionFicha_de_resultados.triggered.connect(lambda: self.fillhtml())

#ABRE EL ARCHIVO CON LOS DATOS A UTILIZAR
    def openfile(self):#
        filePath, _ = QtWidgets.QFileDialog.getOpenFileName(self, 'Open
File',self.currentDir)
        if filePath != "":
            self.lineEdit_12.setText(filePath)
            print("Se lee archivo: "+filePath)

    def htmlTemplate(self):
        with open(TEMPLATE,'r') as file:
            html = file.read()
            filledHTML =
html.format(CON=self.connection,VP=str(self.primaryVoltage),VS=str(self.secondaryVo
ltage),RP=str(self.primaryResistance),RS=str(self.secondaryResistance),TWIRE=str(se
lf.tempWire),THOTT=str(self.hottestSpot),PNLOAD=str(self.noLoadLoss),PLOAD=str(self
.loadLoss),TABLE=str(self.resumenDeDatos.to_html()),GRAPH=str(self.htmlImg),GRAPH_2
=str(self.htmlImg2))
            #filledHTML =
template.format(CON=str(CON),VP=str(VP),VS=str(VS),RP=str(RP),RS=str(RS),TWIRE=str(
TWIRE),THOTT=str(THOTT),PNLOAD=str(PNLOAD),PLOAD=str(PLOAD),TABLE=str(TABLE),GRAPH=
str(GRAPH),GRAPH_2=GRAPH_2)
            with open(os.path.join(self.currentDir,'temp.html'),'w') as wfile:
                wfile.write(filledHTML)

        webbrowser.open(os.path.join(self.currentDir,'temp.html'),new=1)

```

```

def aboutData(self):
    webbrowser.open(DATAURL,new=1)

def exportData(self):
    filePath, _ = QtWidgets.QFileDialog.getSaveFileName(self, 'Save File',
self.currentDir,filter='Excel files (*.xlsx)')
    if filePath != "":
        print(filePath)
        exportDataFrame(self.data, filePath+'.xlsx','HarmonicData')

exportDataFrame(self.data[['Temperatura','Temperatura_1','Temperatura_2','Temperatura_3','Total losses','Total losses_1','Total losses_2','Total losses_3','Losses under load condition','Losses under load condition_1','Losses under load condition_2','Losses under load condition_3','Winding eddy Corrected','Winding eddy Corrected_1','Winding eddy Corrected_2','Winding eddy Corrected_3','%Carga']]).describe(include='all',filePath+'.xlsx','Summary')

def showLoadPercent(self):
    x = self.data['Date']+' '+self.data['Time']
    self.widget.canvas.axes2.cla()

self.widget.canvas.axes2.xaxis.set_major_formatter(matplotlib.dates.DateFormatter("%d/%m/%y %H:%M"))
    self.widget.canvas.axes2.plot(pd.to_datetime(x), self.data['%Carga'], 'r-
.')

    self.widget.canvas.axes2.set_ylabel('Porcentaje de Carga')
    self.widget.canvas.draw()

#INICIA PROCESO DE CALCULO (DATOS CARGADOS)
def execute(self):
    self.readValues() #LEE DIRECTORIO DEL ARCHIVO Y LOS DATOS DE LOS CAMPOS
    self.calculate()
    self.mode = 'mean'

    self.plot()
    self.pushButton.show()
    #print(data.head())
    #self.plot(list(range(data.shape[0])), data['Temperatura'].to_list())

def execute_p(self):
    self.readValues()
    self.calculate()
    self.mode = 'phase'
    self.plot()
    self.pushButton.show()

def clearAll(self):
    self.widget.canvas.axes.cla()
    try:
        self.widget.canvas.axes2.cla()
    except:
        self.widget.canvas.clear()

```

```

self.widget.canvas.draw()
self.pushButton.hide()
self.lineEdit_10.clear()
self.lineEdit_11.clear()
self.lineEdit_12.clear()
self.lineEdit_13.clear()
self.lineEdit_14.clear()
self.lineEdit_2.clear()
self.lineEdit_3.clear()
self.lineEdit_7.clear()
self.lineEdit_8.clear()
self.lineEdit_9.clear()

#PLOTERAR GRAFICO
def plot(self):
    #self.data = self.TemperaturaStimator()

    try:

self.widget.canvas.axes2.xaxis.set_major_formatter(matplotlib.dates.DateFormatter("%
%d/%m/%y %H:%M"))
        self.widget.canvas.axes2.clear()
        self.widget.canvas.axes2.cla()

    except:

        pass

self.widget.canvas.axes.xaxis.set_major_formatter(matplotlib.dates.DateFormatter("%
d/%m/%y %H:%M"))
    self.widget.canvas.draw()
    self.widget.canvas.axes.clear()
    self.widget.canvas.axes.cla()
    x = self.data['Date']+' '+self.data['Time']
    self.widget.canvas.axes2.plot(pd.to_datetime(x),
self.data['%Carga'].mask(self.data['%Carga']>-1), 'r-.')

    #x = x.map(lambda t: datetime.strptime(t, '%d/%m/%Y %H:%M:%S'))
    #x = x.map(str)

matplotlib.pyplot.rc('font', size=8)

#self.widget.canvas.set_xticklabel(rotation=45)
self.widget.canvas.axes.tick_params(axis='x', labelrotation=15)
self.widget.canvas.axes.set_xlabel('Fecha')
self.widget.canvas.axes.set_ylabel('Temperatura [°C]')
self.widget.canvas.axes.set_title('Temperatura del transformador')

```

```

    if self.mode == 'mean':
        y = self.data['Temperatura']

self.widget.canvas.axes.xaxis.set_major_formatter(matplotlib.dates.DateFormatter("%
d/%m/%y %H:%M"))
    self.widget.canvas.axes.plot(pd.to_datetime(x), y)
    self.widget.canvas.axes.xaxis.set_label_coords(-0.05,-0.03)
    self.widget.canvas.draw()
    #plt.subplots_adjust(bottom=0.13, top=0.9)
    #self.widget.canvas.tight_layout()

elif self.mode == 'phase':
    y_1 = self.data['Temperatura_1']
    y_2 = self.data['Temperatura_2']
    y_3 = self.data['Temperatura_3']

    phasesMode = self.comboBoxPhases.currentText()

    if phasesMode == 'Tres fases':
        self.widget.canvas.axes.plot(pd.to_datetime(x), y_1, label='Fase
1')
        self.widget.canvas.axes.plot(pd.to_datetime(x), y_2, label='Fase
2')
        self.widget.canvas.axes.plot(pd.to_datetime(x), y_3, label='Fase
3')
    elif phasesMode == 'Fase 1':
        self.widget.canvas.axes.plot(pd.to_datetime(x), y_1, label='Fase
1')
    elif phasesMode == 'Fase 2':
        self.widget.canvas.axes.plot(pd.to_datetime(x), y_2, label='Fase
2')
    elif phasesMode == 'Fase 3':
        self.widget.canvas.axes.plot(pd.to_datetime(x), y_3, label='Fase
3')

    self.widget.canvas.axes.legend(loc='upper left')

self.widget.canvas.axes.xaxis.set_major_formatter(matplotlib.dates.DateFormatter("%
d/%m/%y %H:%M"))
    #plt.subplots_adjust(bottom=2.13, top=3)
    self.widget.canvas.axes.xaxis.set_label_coords(-0.05,-0.03)
    self.widget.canvas.draw()
else:
    y = []

def calculate(self):
    self.mode = 'mean'
    self.TemperaturaStimator()
    self.mode = 'phase'
    self.TemperaturaStimator()
    self.mode = ''

```

```

        self.data['Fecha'] = pd.to_datetime(self.data['Date']+'
'+self.data['Time'])

        self.resumenDeDatos =
self.data[['%Carga', 'Temperatura_1', 'Temperatura_2', 'Temperatura_3', 'Temperatura']]
.describe().rename(index={
            'count': 'cuenta',
            'mean': 'media'
        })
#self.resumenDeDatos.apply(self.resumenDeDatos.loc[0])
fig, axes = plt.subplots(1,1)
matplotlib.pyplot.rc('font', size=8)
#axes2 = axes.twinx()
ax = self.data.plot(kind='line', x='Fecha', y='Temperatura', color='blue')
ax2 = self.data.plot(kind='line', x='Fecha', y='%Carga', secondary_y=True,
color='red', ax=ax, style='-.')
ax.set_title('Temperatura y % de carga del transformador.')
ax.set_ylabel('Temperatura [°C]')
ax2.set_ylabel('Porcentaje de Carga')
plt.tight_layout()
plt.savefig('temperatura.png')
#self.htmlImg = mpld3.fig_to_html(fig)
self.htmlImg = 'temperatura.png'
print(self.htmlImg)

fig, ax = plt.subplots(1,1)
# matplotlib.pyplot.rc('font', size=8)
#axes2 = axes.twinx()
self.data.plot(kind='line', x='Fecha',
y=['Temperatura_1', 'Temperatura_2', 'Temperatura_3'], color=['blue', 'red', 'green'],
title='Temperatura por fase del transformador.', ylabel='Temperatura [°C]')
plt.tight_layout()
plt.savefig('temperaturas_fase.png')
#self.htmlImg = mpld3.fig_to_html(fig)
self.htmlImg2 = 'temperaturas_fase.png'
print(self.htmlImg2)

def summaryWindow(self):
    self.summaryWin = QtWidgets.QMainWindow()
    self.summaryUi = SummaryWindow()
    table = pd.DataFrame()
    table =
self.data[['%Carga', 'Temperatura_1', 'Temperatura_2', 'Temperatura_3', 'Temperatura']]
.describe()
    table.insert(loc=0, value=['Cuenta',
'Media', 'std', 'min', '25%', '50%', '75%', 'max'], column='Valor')
    self.summaryUi.setupUi(self.summaryWin, table)
    self.summaryWin.show()

#CALCULO DE LOS CAMPOS DE DATOS INDICADOS POR EL USUARIO (CONSTANTES)
def TemperaturaStimator(self):
    ds_h = CircutorHarmonicAnalysis(self.fileDir, mode=self.mode)

```

```

ds = ds_h.harmonicDistribution()

r1 = float(self.primaryResistance) *
CONNECTION_MULTIPLIER[self.connection][0]
r2 = float(self.secondaryResistance) *
CONNECTION_MULTIPLIER[self.connection][1]

i_1r = float(self.power_kVA*1000) / (float(self.primaryVoltage) * (3 **
0.5))
i_2r = float(self.power_kVA*1000) / (float(self.secondaryVoltage) * (3 **
0.5))

i2r = TRANSFORMERTYPE_K[self.transformerType] * ((i_1r ** 2) * r1 + (i_2r
** 2) * r2)
p_tsl_r = float(self.loadLoss) - i2r
p_ec_r = p_tsl_r * sum(self.eddyLossPercent())
p_osl_r = p_tsl_r - p_ec_r
total_loss = float(self.noLoadLoss) + i2r + p_tsl_r

ds['%Carga'] = ds['Potencia aparente'].map(lambda x:
x*100/(self.power_kVA*1000))

#OBTENCION DE VALORES
if self.mode == 'mean':
    ds['P_LL_(pu)'] =
ds['S(I_h/I_R)^2'].multiply(ds['%Carga'].pow(2)/10000)
    ds['I^2*R'] = ds['P_LL_(pu)'].map(lambda x: x*i2r)
    ds['Winding eddy'] = ds['P_LL_(pu)'].map(lambda x: x*p_ec_r)
    ds['Other stray'] = ds['P_LL_(pu)'].map(lambda x: x*p_osl_r)
    ds['Winding eddy Corrected'] = ds['Winding eddy'].mul(ds['S(I_h/I_R)^2
* h^2'].div(ds['S(I_h/I_R)^2']))
    ds['Other stray Corrected'] = ds['Other stray'].mul(ds['S(I_h/I_R)^2 *
h^0.8'].div(ds['S(I_h/I_R)^2']))
    ds['Total losses'] = ds[['I^2*R', 'Winding eddy Corrected', 'Other
stray Corrected']].sum(axis=1).map(lambda x: x+self.noLoadLoss)

    ds['Theta_TO'] = ds['Total losses'].map(lambda x:
x/total_loss).pow(0.8).map(lambda x: x*self.tempWire)

    i_2r2R = TRANSFORMERTYPE_K[self.transformerType]*r2*i_2r**2
    ds['Losses under load condition'] = ds['P_LL_(pu)'].map(lambda x:
x*i_2r2R)

    num = ds['Winding eddy Corrected'].map(lambda x:
x*self.eddyLossPercent()[0]*4)+ds['Losses under load condition']
    den = ds['Winding eddy'].map(lambda x: x+i2r)

    ds['Theta_g'] = ((num.div(den)).pow(0.8)).map(lambda x: x *
(self.hottestSpot - self.tempWire))

    ds['Temperatura'] = ds['Theta_TO']+ds['Theta_g']

```

```

        self.data[ds.columns] = ds

        #self.data = self.data.assign(ds)
        #return ds #RETORNO DE TABLA CON DISTRIBUCION ARMONICA CORREGIDA
        PERDIDAS Y TEMPERATURA

        elif self.mode == 'phase':
            for p in [1,2,3]:
                ds[f'P_LL_(pu)_{p}'] =
ds[f'S(I_h/I_R)^2_{p}'].multiply(ds['%Carga'].pow(2)/10000)
                ds[f'I^2*R_{p}'] = ds[f'P_LL_(pu)_{p}'].map(lambda x: x*i2r)
                ds[f'Winding eddy_{p}'] = ds[f'P_LL_(pu)_{p}'].map(lambda x:
x*p_ec_r)
                ds[f'Other stray_{p}'] = ds[f'P_LL_(pu)_{p}'].map(lambda x:
x*p_osl_r)
                ds[f'Winding eddy Corrected_{p}'] = ds[f'Winding
eddy_{p}'].mul(ds[f'S(I_h/I_R)^2 * h^2_{p}'].div(ds[f'S(I_h/I_R)^2_{p}']))
                ds[f'Other stray Corrected_{p}'] = ds[f'Other
stray_{p}'].mul(ds[f'S(I_h/I_R)^2 * h^0.8_{p}'].div(ds[f'S(I_h/I_R)^2_{p}']))
                ds[f'Total losses_{p}'] = ds[[f'I^2*R_{p}', f'Winding eddy
Corrected_{p}', f'Other stray Corrected_{p}']].sum(axis=1).map(lambda x:
x+self.noLoadLoss)

                ds[f'Theta_TO_{p}'] = ds[f'Total losses_{p}'].map(lambda x:
x/total_loss).pow(0.8).map(lambda x: x*self.tempWire)

                i_2r2R = TRANSFORMERTYPE_K[self.transformerType]*r2*i_2r**2
                ds[f'Losses under load condition_{p}'] =
ds[f'P_LL_(pu)_{p}'].map(lambda x: x*i_2r2R)

                num = ds[f'Winding eddy Corrected_{p}'].map(lambda x:
x*self.eddyLossPercent()[0]*4)+ds[f'Losses under load condition_{p}']
                den = ds[f'Winding eddy_{p}'].map(lambda x: x+i2r)

                ds[f'Theta_g_{p}'] = ((num.div(den)).pow(0.8)).map(lambda x: x *
(self.hottestSpot - self.tempWire))

                ds[f'Temperatura_{p}'] = ds[f'Theta_TO_{p}']+ds[f'Theta_g_{p}']
            #return ds
            #self.data = self.data.assign(ds)
            self.data[ds.columns] = ds

#SETEO DE CRITERIOS SEGUN PAPER O NORMA IEEE
def eddyLossPercent(self):
    if self.power_kVA <= 300:
        return (.55,.05)
    elif 300 < self.power_kVA <= 1000:
        return (.40,.10)
    elif 1000 < self.power_kVA <= 3000:
        return (.20,.10)
    else:
        return (.25,.15)

```

```

#LECTURA DE VALORES DADOS POR USUARIO
def readValues(self):
    self.fileDir = self.lineEdit_12.text() or 'file.TXT'# VALORES DE PRUEBA
    self.connection = str(self.comboBox.currentText())
    self.transformerType = self.comboBox_2.currentText()
    self.power_kVA = float(self.lineEdit_7.text() or '1000')# VALORES DE PRUEBA
    #self.loadPercent = float(self.lineEdit.text() or '75')/100 # VALORES DE
PRUEBA
    self.primaryVoltage = float(self.lineEdit_2.text() or '13200')# VALORES DE
PRUEBA
    self.secondaryVoltage = float(self.lineEdit_3.text() or '240') # VALORES DE
PRUEBA
    self.primaryResistance = float(self.lineEdit_8.text() or '12') # VALORES DE
PRUEBA
    self.secondaryResistance = float(self.lineEdit_11.text() or '0.0009') #
VALORES DE PRUEBA
    self.tempWire = float(self.lineEdit_9.text() or '45') # VALORES DE PRUEBA
    self.hottestSpot = float(self.lineEdit_10.text() or '55') # VALORES DE
PRUEBA
    self.noLoadLoss = float(self.lineEdit_13.text() or '978') # VALORES DE
PRUEBA
    self.loadLoss = float(self.lineEdit_14.text() or '6879') # VALORES DE
PRUEBA

    print(self.connection)
    print(CONNECTION_MULTIPLIER[self.connection])

#INSTRUCCIONES DE TERMINAL
if __name__ == '__main__':
    app = QtWidgets.QApplication([])
    window = ThermalCurve()
    window.show()
    app.exec()

```

B. Código circutorAnalysis.py

```
import pandas as pd
import numpy as np

#CLASE PARA LECTOR DE ARCHIVO CIRCUITOR
class CircutorHarmonicAnalysis(object):
    def __init__(self, filePath: str, mode: str):
        self.filePath = filePath
        self.dataset = pd.read_csv(filePath, sep = ',')
        self.mode = mode
#DETECTA ARMONICO MAS GRANDE PARA SETEAR EL TAMANO DEL ANALISIS
    self.maxHarmonic = self.myMaxHarmonic()
    self.harmonics = list(range(1, self.maxHarmonic + 1)) #INTERACION DE ORDEN
DE ARMONICOS

#VALOR MAS GRANDE Y DEFINICION DE ARCHIVO
    def myMaxHarmonic(self):
        s = ''.join(self.dataset.columns).split(' ')
        return max([int(n) for n in s if n.isnumeric()])

#PROMEDIO DE ARMONICO POR FASE 1 2 Y 3
    def harmonicsPercent(self) -> pd.DataFrame:
        dsHarmonics = pd.DataFrame()

        #All other harmonics current are fundamental refered
        if self.mode == 'mean':
            dsHarmonics['%Armónico '+str(1)] = 100
            for h in range(2, self.maxHarmonic+1):
                dsHarmonics['%Armónico '+str(h)] = self.dataset[['Harmonics IL1:
Harmonic '+str(h)+' (%IL1)',
                                                                    'Harmonics IL2:
Harmonic '+str(h)+' (%IL2)',
                                                                    'Harmonics IL3:
Harmonic '+str(h)+' (%IL3)']].mean(axis=1)

            dsHarmonics = dsHarmonics.div(100)
        elif self.mode == 'phase':
            dsHarmonics['%Armónico 1_1'] = 100
            dsHarmonics['%Armónico 1_2'] = 100
            dsHarmonics['%Armónico 1_3'] = 100
            for h in range(2, self.maxHarmonic+1):
                for p in [1,2,3]:
                    dsHarmonics[f'%Armónico {h}_{p}'] = self.dataset[f'Harmonics
IL{p}: Harmonic {h} (%IL{p})']
            dsHarmonics = dsHarmonics.div(100)
        else:
            return dsHarmonics
        return dsHarmonics

    def harmonicList(self, l, p):
```

```

ol = []
for i in l:
    ol.append(f'%Armónico {i}_{p}')
return ol

#CALCULO DE DISTRIBUCION ARMONICA
def harmonicDistribution(self) -> pd.DataFrame:
    hDist = pd.DataFrame()
    dsHarmonics = self.harmonicsPercent()
    hDist[['Date', 'Time']] = self.dataset[['Date', 'Time']]
    if self.mode == 'mean':
        hDist['S(I_h/I_R)^2'] = dsHarmonics.pow(2).sum(axis=1)+1
        hDist['S(I_h/I_R)^2 * h^2'] = dsHarmonics.pow(2).mul([x**2 for x in
self.harmonics], axis=1).sum(axis=1)+1
        hDist['S(I_h/I_R)^2 * h^0.8'] = dsHarmonics.pow(2).mul([x**0.8 for x in
self.harmonics], axis=1).sum(axis=1)+1
        print(hDist)

    elif self.mode == 'phase':
        for f in [1,2,3]:
            hDist[f'S(I_h/I_R)^2_{f}'] =
dsHarmonics[self.harmonicList(list(range(1,self.maxHarmonic+1)),f)].pow(2).sum(axis
=1)+1
            hDist[f'S(I_h/I_R)^2 * h^2_{f}'] =
dsHarmonics[self.harmonicList(list(range(1,self.maxHarmonic+1)),f)].pow(2).mul([x**
2 for x in self.harmonics], axis=1).sum(axis=1)+1
            hDist[f'S(I_h/I_R)^2 * h^0.8_{f}'] =
dsHarmonics[self.harmonicList(list(range(1,self.maxHarmonic+1)),f)].pow(2).mul([x**
0.8 for x in self.harmonics], axis=1).sum(axis=1)+1
        else:
            pass
        try:

            hDist['Potencia aparente'] = self.dataset['Aparent power: Triphasic
(VA)']

        except:
            try:

                hDist['Potencia aparente'] = self.dataset['Aparent power: Triphasic
(kVA)'].map(lambda x:x*1000)

            except:
                hDist['Potencia aparente'] = self.dataset['Aparent power: Triphasic
(MVA)'].map(lambda x:x*1000000)

        return hDist

```

C. Código exportFiles.py

```
import pandas as pd
import os
from openpyxl import load_workbook
import webbrowser
import sys

def resource_path(relative_path):
    try:
        base_path = sys._MEIPASS
    except Exception:
        base_path = os.path.abspath(".")
    return os.path.join(base_path, relative_path)

def
htmlTemplate(template, currentdir, CON, VP, VS, RP, RS, TWIRE, THOTT, PNLOAD, PLOAD, TABLE, GRA
PH, GRAPH_2):
    with open(template, 'r') as file:
        html = file.read()
        filledHTML =
html.format(CON=str(CON), VP=str(VP), VS=str(VS), RP=str(RP), RS=str(RS), TWIRE=str(TWIR
E), THOTT=str(THOTT), PNLOAD=str(PNLOAD), PLOAD=str(PLOAD), TABLE=str(TABLE), GRAPH=str(
GRAPH), GRAPH_2=str(GRAPH_2))
        #filledHTML =
template.format(CON=str(CON), VP=str(VP), VS=str(VS), RP=str(RP), RS=str(RS), TWIRE=str(
TWIRE), THOTT=str(THOTT), PNLOAD=str(PNLOAD), PLOAD=str(PLOAD), TABLE=str(TABLE), GRAPH=
str(GRAPH), GRAPH_2=GRAPH_2)
        with open(os.path.join(currentdir, 'temporal.html'), 'w') as wfile:
            wfile.write(filledHTML)

webbrowser.open(os.path.join(currentdir, 'temporal.html'), new=1)

def exportDataFrame(df:pd.DataFrame, path:str, sheet_name:str):
    if not os.path.isfile(path):
        writer = pd.ExcelWriter(path, engine='openpyxl')
        df.to_excel(writer, sheet_name=sheet_name, index=False)
        writer.save()
    else:
        #Create new sheet
        book = load_workbook(path)
        writer = pd.ExcelWriter(path, engine='openpyxl', index=False)
        writer.book = book

        df.to_excel(writer, sheet_name=sheet_name)
        writer.save()
        writer.close()
```

D. Imágenes de visitas a sujetos de prueba



