



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica

EFFECTO DE LA SATURACIÓN DEL NÚCLEO EN TRANSFORMADORES DE CORRIENTE DE MEDIA Y BAJA TENSIÓN

Werner Saúl Zepeda López

Asesorado por el Ing. Gustavo Benigno Orozco Godínez

Guatemala, octubre de 2018

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**EFFECTO DE LA SATURACIÓN DEL NÚCLEO EN TRANSFORMADORES DE
CORRIENTE DE MEDIA Y BAJA TENSIÓN**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA

POR

WERNER SAÚL ZEPEDA LÓPEZ

ASESORADO POR EL ING. GUSTAVO BENIGNO OROZCO GODÍNEZ

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO ELECTRICISTA

GUATEMALA, OCTUBRE DE 2018

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL I	Ing. Angel Roberto Sic García
VOCAL II	Ing. Pablo Christian de León Rodríguez
VOCAL III	Ing. José Milton De León Bran
VOCAL IV	Br. Oscar Humberto Galicia Nuñez
VOCAL V	Br. Carlos Enrique Gómez Donis
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Murphy Olympto Paiz Recinos
EXAMINADOR	Ing. José Guillermo Bedoya Barrios
EXAMINADOR	Ing. Armando Alonzo Rivera Castillo
EXAMINADOR	Ing. Bayron Armando Cuyán Culajay
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

EFFECTO DE LA SATURACIÓN DEL NÚCLEO EN TRANSFORMADORES DE CORRIENTE DE MEDIA Y BAJA TENSIÓN

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, con fecha 7 de noviembre de 2016.

Werner Saúl Zepeda López

Guatemala, 05 de marzo de 2018.


Ingeniero Saúl Cabezas
Coordinador Área de Potencia
Escuela Mecánica Eléctrica
Facultad de Ingeniería
USAC.

Estimado Ingeniero:

De acuerdo con la designación efectuada por la Dirección de Escuela, me permito informarle que he procedido a asesorar el Trabajo de Graduación titulado: **EFFECTO DE LA SATURACION DEL NUCLEO EN TRANSFORMADORES DE CORRIENTE DE MEDIA Y BAJA TENSION**, desarrollado por el estudiante WERNER SAUL ZEPEDA LOPEZ, carne 2008-15435 y, encontrándolo satisfactorio en su contenido y resultados, me permito dar aprobación al mismo, remitiéndolo a esa Coordinación para el tramite pertinente, en el entendido que el Autor y este Asesor somos responsables del contenido y conclusiones del Trabajo.

Agradeciendo la atención a la presente, me es grato suscribirme, deseándole éxitos en sus labores cotidianas.

Atentamente,


Ing. Gustavo Benigno Orozco Godínez.
Colegiado 1,879
ASESOR

ING. GUSTAVO B. OROZCO
COLEGIADO 1879



REF. EIME 46. 2018.
25 DE ABRIL 2018.

Señor Director
Ing. Otto Fernando Andrino González
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica
Facultad de Ingeniería, USAC.

Señor Director:

Me permito dar aprobación al trabajo de **Graduación** titulado:
EFFECTO DE LA SATURACIÓN DEL NÚCLEO EN TRANSFORMADORES DE CORRIENTE DE MEDIA Y BAJA TENSIÓN, del estudiante; **Werner Saúl Zepeda López,** que cumple con los requisitos establecidos para tal fin.

Sin otro particular, aprovecho la oportunidad para saludarle.

Atentamente,
ID Y ENSEÑAD A TODOS

M.B.A. Ing. Saul Cabezas Durán
Ingeniero Electricista
Colegiado No. 4648

Ing. Saúl Cabezas Durán
Coordinador de Potencia





REF. EIME 46. 2018.

El Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, después de conocer el dictamen el Asesor, con el Visto Bueno del Coordinador de Área, al trabajo de Graduación del estudiante: **WERNER SAÚL ZEPEDA LÓPEZ** titulado: **EFFECTO DE LA SATURACIÓN DEL NÚCLEO EN TRANSFORMADORES DE CORRIENTE DE MEDIA Y BAJA TENSIÓN,** procede a la autorización del mismo.


Ing. Otto Fernando Andrino González



GUATEMALA, 16 DE JULIO 2018.

Universidad de San Carlos
de Guatemala

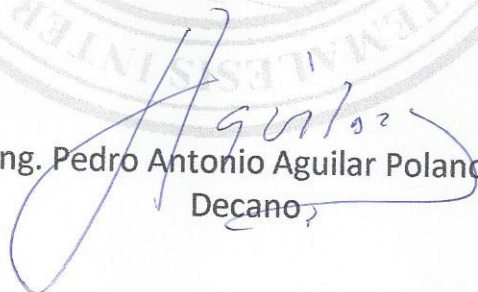


Facultad de Ingeniería
Decanato

DTG. 371.2018

El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, al Trabajo de Graduación titulado: **EFFECTO DE LA SATURACIÓN DEL NÚCLEO EN TRANSFORMADORES DE CORRIENTE DE MEDIA Y BAJA TENSIÓN**, presentado por el estudiante universitario: **Werner Saúl Zepeda López**, y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:


Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
Decano

Guatemala, octubre de 2018

/gdech



ACTO QUE DEDICO A:

Dios	Por ser el centro de mi vida y fuente de fe, paciencia y esperanza.
Mis padres	Saúl Zepeda y Mirma López, por su guía moral y apoyo incondicional, motores fundamentales en mi vida.
Mi esposa	Jackeline Aguilar de Zepeda, porque siempre ha estado para apoyarme y animarme.
Mis hermanas	Ligia y Marisol, quienes han sido de gran ayuda en mi carrera.
Mis abuelos	Felipe López, Manuel Zepeda y María Guerra, quienes sembraron en mí el deseo de la búsqueda del conocimiento. Que en paz descansen.
Mi abuela	Ignacia Salguero, quien es fuente de sabiduría, ejemplo de paciencia, bondad y benignidad.
Mis pastores	Juan Francisco Véliz y Marilena de Véliz, quienes han sido mis mentores de fe.

AGRADECIMIENTOS A:

Universidad de San Carlos de Guatemala	Por brindarme la oportunidad hacia el crecimiento y desarrollo personal, fuente inagotable de conocimiento.
Facultad de Ingeniería	Por abrirme las puertas al conocimiento de las ciencias y por ser la incubadora de mi talento.
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica	Por brindarme las herramientas necesarias para la experimentación.
Los catedráticos	Por tan excelente labor de compartir el conocimiento adquirido a través de la experiencia en el ejercicio de sus carreras.
Empresa Eléctrica de Guatemala, S.A.	Por apoyarme en la ejecución del trabajo de graduación.
Ing. Benigno Orozco	Por su excelente enseñanza y apoyo como asesor del trabajo de graduación.
Ing. Giovanni Salazar	Por su constante motivación a ser un profesional con valores éticos.
Ing. José Manuel Solís	Por sus incesantes enseñanzas acerca de un liderazgo positivo.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	V
LISTA DE SÍMBOLOS	IX
GLOSARIO	XI
RESUMEN.....	XV
OBJETIVOS.....	XVII
INTRODUCCIÓN.....	XIX
1. CAPÍTULO UNO: GENERALIDADES DE LOS TRANSFORMADORES PARA MEDICIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA	1
1.1. Partes de un transformador eléctrico para medida.....	2
1.1.1. Devanado primario y secundario	2
1.1.2. Núcleo	4
1.1.3. Encapsulado	5
1.1.4. Terminales.....	5
1.2. Principio de funcionamiento del transformador ideal	6
1.2.1. Ecuaciones básicas que definen el comportamiento de un transformador.....	8
1.2.2. Relación de transformación	9
1.2.3. Curva de magnetización del núcleo.....	10
1.3. Aspectos fundamentales de los transformadores de corriente.....	14
2. IMPORTANCIA DE LA EXACTITUD EN LOS TRANSFORMADORES DE CORRIENTE.....	17

2.1.	Clases de exactitud comerciales.....	18
2.2.	Comportamiento de la exactitud de transformadores de corriente	19
2.2.1.	Error de relación.....	22
2.2.2.	Error de ángulo de fase.....	23
2.2.3.	Efecto de la carga secundaria en la relación y ángulo de fase.....	25
2.2.4.	Efecto de la corriente primaria en la relación y ángulo de fase.....	25
2.3.	Transformadores convencionales y de rango extendido.....	28
2.3.1.	Transformadores de corriente convencionales.....	29
2.3.2.	Transformadores de corriente de alta exactitud o rango extendido.....	30
2.4.	Gráfico del paralelogramo	31
3.	EFFECTO DE LA TEMPERATURA EN LA EXACTITUD DEL TRANSFORMADOR DE CORRIENTE.....	37
3.1.	Factor de Corriente Térmica Continua (RF)	38
3.2.	Pruebas de laboratorio	41
3.2.1.	Transformador para baja tensión	41
3.2.2.	Transformador para media tensión	46
3.3.	Selección de un transformador de corriente.....	52
3.3.1.	Tipo de norma de fabricación	52
3.3.2.	Frecuencia de la red.....	53
3.3.3.	Voltaje primario	53
3.3.4.	Corriente primaria del servicio.....	55
3.3.5.	Corriente primaria nominal del TC.....	55
3.3.6.	Valor de la corriente secundaria nominal	56
3.3.7.	Carga nominal secundaria.....	57

4.	EFFECTO DE LA SATURACIÓN DEL NÚCLEO EN EL TRANSFORMADOR DE CORRIENTE	59
4.1.	Saturación del núcleo del transformador de corriente por sobrecarga.....	59
4.1.1.	Factor de carga.....	61
4.2.	Saturación provocada por agentes externos a la instalación...	64
4.3.	Razones por las que se debe reemplazar un transformador de corriente.....	65
4.3.1.	Deterioro de aislamiento por condiciones ambientales	65
4.3.2.	Deterioro del aislamiento por fallas eléctricas.....	66
4.3.3.	Equipo sobrecargado.....	67
5.	MÉTODOS PARA EVITAR LA SATURACIÓN DEL NÚCLEO EN TRANSFORMADORES DE CORRIENTE.....	71
5.1.	Verificaciones periódicas	71
5.2.	Instalación de equipos de medida con perfiles de carga	72
5.3.	Estudios termográficos	74
	CONCLUSIONES	77
	RECOMENDACIONES	79
	BIBLIOGRAFÍA.....	81
	APÉNDICES	83
	ANEXOS.....	91

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Transformador de corriente para baja tensión tipo ventana	4
2.	Partes de un transformador en su forma más simple.....	6
3.	Transformador eléctrico con sus variables eléctricas.....	8
4.	Estructura cristalina cúbica centrada en el interior del hierro.	10
5.	Esquema de dominios magnéticos de un material ferromagnético alineándose con un campo creciente.	11
6.	Anillo toroidal en el cual se devana un conductor	11
7.	Gráfico de la variación del campo magnético en el tiempo	12
8.	Curva de histéresis para una muestra inicialmente desimanada.	14
9.	Uso del transformador de corriente para medida en una instalación eléctrica.....	16
10.	Circuito equivalente simplificado de un TC	21
11.	Diagrama vectorial de los errores de fase y de amplitud.....	22
12.	Curva típica de corriente de excitación de un transformador de corriente.....	27
13.	Curva característica de relación y ángulo de fase para un transformador de corriente a 60 Hertz.....	28
14.	Gráfica del túnel transformador de corriente clase 0.3.....	29
15.	Gráfica del túnel transformador de corriente clase 0.15.....	30
16.	Límites de exactitud para transformadores de corriente clase 0.3, 0.6 y 1.2.....	33
17.	Gráfico del paralelogramo de un transformador de corriente	35
18.	Curvas RF para transformadores de corriente	40

19.	Gráfico del paralelogramo de prueba estándar TC 600:5 - BT	43
20.	Gráfico del paralelogramo de una prueba en condiciones de sobrecarga TC 600:5 – BT.....	45
21.	Gráfico del paralelogramo de prueba estándar TC 25:5 - MT.....	49
22.	Gráfico del paralelogramo de una prueba en condiciones de sobrecarga TC 25:5 – MT.....	51
23.	Transformador de corriente de 200:5 para baja tensión	54
24.	Transformador de corriente de 200:5 para media tensión	54
25.	Placa de características de un TC	58
26.	Placa de datos de un transformador de corriente para medida para 600 voltios – TC para baja tensión.....	60
27.	Curva de corrientes en 24 horas.....	61
28.	Consumo de energía en un período de 24 horas	63
29.	Aislamiento deteriorado de transformador de corriente para media tensión.....	66
30.	Transformador dañado por falla eléctrica	67
31.	Demanda de potencia en kVA por lapso de siete días.	68
32.	Gráfico de demanda de potencia por lapso de siete días.	69
33.	Transformador de corriente en operación con daños en el aislamiento.....	72
34.	Perfil de demanda de potencia en kVA.....	74
35.	Fotografía termográfica de transformadores de corriente operando al 168 % de su capacidad.....	75
36.	Fotografía termográfica de un transformador de corriente para baja tensión tipo ventana.....	76

TABLAS

I.	Interpretación de la relación de transformación	9
----	---	---

II.	Tabla de clases de exactitud comerciales.....	18
III.	Puntos de medida según IEEE C57.13.....	34
IV.	Datos de un transformador de corriente para baja tensión	41
V.	Valores de FCR y desplazamiento de fase en prueba estándar	42
VI.	Valores de FCR y desplazamiento de fase en prueba a saturación.....	44
VII.	Datos de un transformador de corriente para baja tensión	47
VIII.	Valores de FCR y desplazamiento de fase en prueba estándar	47
IX.	Valores de FCR y desplazamiento de fase en prueba a saturación.....	50
X.	Burden estandarizados para transformadores de corriente para medición con devanados secundarios a 5A	57

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
A	Amperios
I	Corriente eléctrica
I_1	Corriente en devanado primario
I_2	Corriente en devanado secundario
I_e	Corriente de excitación
\$	Dólar estadounidense
η	Error de relación
$k\varepsilon$	Factor de corrección del ángulo de fase
φ_B	Flujo magnético
Hz	Hertz, Hertzios
Z_L	Impedancia de carga
H	Intensidad de campo magnético
N_1, N_p	Número de espiras en devanado primario
N_2, N_s	Número de espiras en devanado secundario
S	Potencia eléctrica aparente
a	Relación de transformación
Ω	Unidad de medida de la resistencia eléctrica: ohmio
e	Voltaje inducido
V	Voltaje o diferencia de potencial
V_1	Voltaje en devanado primario
V_2	Voltaje en devanado secundario

GLOSARIO

Acometida	Grupo de componentes utilizados para llevar la energía eléctrica desde las líneas de distribución de la distribuidora hasta la instalación eléctrica de un usuario en particular.
Amperio	Unidad de medida de la corriente eléctrica equivalente al paso de un Coulomb de carga, por un punto dado de un circuito eléctrico, en un segundo.
Burden	La carga, normalmente expresada en voltamperios a un factor de potencia especificado, se coloca en los secundarios de los transformadores de instrumentos por las bobinas de medida asociadas, los conductores y otros dispositivos conectados.
Consumo	Cantidad de kilovatios-hora que un determinado usuario ha tomado de la red en un período dado de tiempo, generalmente un mes.
Cortacircuitos	Aparato que automáticamente interrumpe la corriente eléctrica cuando es excesiva o peligrosa.
Demanda	Requerimiento, en kilovatios, que un determinado usuario hace al sistema de distribución de energía eléctrica en un momento dado.

Devanado	Enrollar un hilo, un alambre, una cuerda u otro material alrededor de un eje o un carrete.
Epoxi	Dicho de una resina: sintética, dura y resistente, utilizada en la fabricación de plásticos, pegamentos, etc.
Error	Desviación a partir del valor real de la variable medida.
Exactitud	Aproximación con la cual la lectura de un instrumento se acerca al valor real de la variable medida.
Fusible	Hilo o chapa metálica que se coloca en algunas partes de las instalaciones eléctricas, para que, cuando la corriente sea excesiva, la interrumpa fundiéndose.
Histéresis	Fenómeno por el que el estado de un material depende de su historia previa y que se manifiesta por el retraso del efecto sobre la causa que lo produce.
IEEE	Iniciales en idioma inglés del Instituto de Ingenieros Electricistas y en Electrónica.
Instrumento	Dispositivo para determinar el valor o la magnitud de una cantidad o variable.

Kilovatio – Hora	Unidad de medida de la energía eléctrica equivalente a una demanda de un kilovatio durante una hora.
Kilovatio	Unidad de medida de la potencia eléctrica equivalente a cuando, en un circuito eléctrico de un voltio, circula una corriente de un amperio.
Kilovoltio	Magnitud de voltaje equivalente a mil voltios.
Pararrayos	Artificio compuesto de una o más varillas de hierro terminadas en punta y unidas entre sí y con la tierra húmeda, o con el agua, por medio de conductores metálicos. Se coloca sobre los edificios o los buques para preservarlos de los efectos de la electricidad de las nubes.
Precisión	Medida de la reproducibilidad de las mediciones; esto es, dado el valor fijo de una variable, la precisión es una medida del grado con el cual las mediciones sucesivas difieren una de la otra.
Preciso	Dicho de un instrumento de medida: que permite medir magnitudes con un error mínimo.
Proporción	Se trata de la relación de transformación en su mínima expresión, normalmente una proporción mínima.

Relación	Se trata de la relación de transformación en forma de proporciones de valores primarios y secundarios nominales de transformador de instrumento.
Transformador	Aparato para convertir la corriente alterna de alta tensión y débil intensidad en otra de baja tensión y gran intensidad, o viceversa.
Transformador de instrumento	Transformador que se usa en la medición de energía eléctrica.
Trifásico	Servicio de energía eléctrica que utiliza las tres fases del sistema de distribución para funcionar.
Vatio-hora	Unidad de medida de la energía eléctrica.
Voltio	Unidad de medida del voltaje.

RESUMEN

El concepto transformador sobrecargado puede ser inquietante, ya que los transformadores de potencia no deben ser sobrecargados de potencia más allá que la que pueden transferir dichos equipos. Sin embargo, cuando se trata de transformadores de corriente para medida, no es tan alarmante; esto debido a que los fabricantes pueden diseñar transformadores de corriente para medida que puedan soportar corrientes superiores a las nominales, para lo cual existe un concepto denominado factor de corriente térmica continua (RF). Los transformadores de corriente para baja tensión tienen la capacidad de medir hasta cuatro veces la corriente para la cual fueron diseñados, claro está que esto dependerá de la temperatura ambiente promedio a la cual sean sometidos.

La instalación de transformadores de corriente para baja y media tensión, y también el monitoreo de las corrientes a las cuales han sido sometidos, ayuda a demostrar el concepto de factor de corriente térmica continua (RF). Se han instalado y monitoreado transformadores de corriente para baja y media tensión.

El concepto de factor de corriente térmica continua aplica para todos los transformadores de corriente para medida, por lo que se debe evaluar cuál es dicho factor para cada transformador de corriente, ya que pueden variar desde 1.2 hasta 4.0, dependiendo del voltaje para el cual fueron diseñados y/o las características con las cuales se ha comprado al fabricante.

OBJETIVOS

General

Demostrar los efectos que causa una saturación del campo magnético en el núcleo de los transformadores de corriente de media y baja tensión.

Específicos

1. Conocer el funcionamiento de los transformadores de corriente.
2. Mostrar la importancia de la exactitud en los transformadores de corriente.
3. Mostrar la relación que existe entre la saturación del núcleo del transformador con la exactitud de la medición del mismo.
4. Ofrecer métodos para evitar la saturación del núcleo de transformadores de corriente.
5. Dar a conocer a las distribuidoras de energía eléctrica una herramienta más para la correcta medición de la energía eléctrica.

INTRODUCCIÓN

En la medición a consumidores masivos de energía, como industrias y grandes comercios, se hace necesario el uso de medios de transformación a los que se les llama transformadores de instrumento. Sin embargo, cuando de transformadores de instrumento se trata se tienen dos tipos: los transformadores para protección y los transformadores para medida comercial. Los transformadores para medida comercial difieren de los transformadores para protección debido a que en el uso de los transformadores de medida comercial se requieren niveles de exactitud superiores a las exactitudes ofrecidas por los transformadores para protección, ya que las medidas obtenidas en los transformadores para medición comercial serán utilizadas para la cuantificación de costos económicos de compra y venta de energía entre generadores y comercializadores, así como entre comercializadores y consumidores masivos, de ahí la importancia de la exactitud.

Los parámetros eléctricos importantes para la medición comercial son la energía consumida (kWh), la demanda de potencia activa (kW), la energía reactiva consumida (kVARh) y el factor de potencia (fp). Para ello se requiere de dos variables eléctricas muy importantes que son la corriente eléctrica y la diferencia de potencial. Para la medición de diferencia de potencial se utilizan transformadores de potencial o transformadores de voltaje (TV, PT o VT en sus siglas del inglés), y para la medición de corriente se utilizan los transformadores de corriente (TC o CT en sus siglas del inglés). El enfoque del estudio se centra en la investigación y explicación del funcionamiento únicamente de los transformadores de corriente en condiciones de sobrecarga, con el fin de conocer la correcta selección de transformadores para medición comercial.

Para sacar provecho de los equipos es importante conocer el límite mínimo de medición de corriente sin perder exactitud y el límite máximo sin perder exactitud y sin dañarse. Es por ello que es necesario conocer el funcionamiento de estos equipos, así como conocer cuáles son las limitantes que ofrecen estos equipos en funcionamiento, tales como el sobredimensionamiento y la sobrecarga de los mismos. Tanto el sobredimensionamiento como la sobrecarga pueden llevar a la inexactitud de los equipos y los precios de estos equipos, y hacen que tomar la decisión de qué transformadores de medición comercial se deben usar sea una decisión importante para el correcto uso del recurso económico, sin embargo, los cuestionamientos son: ¿hasta dónde se puede llevar la sobrecarga de los transformadores para medida comercial sin dañarlos y mantener la exactitud que indica en la placa del fabricante? ¿Cuál es el rango de capacidad en que el transformador de corriente es exacto? ¿Cuándo es necesario el reemplazo de los transformadores de corriente por sobrecarga?

Al estudiar la normativa IEEE C57.13 es posible encontrar los parámetros establecidos internacionalmente de la sobrecarga de estos equipos, en los cuales la sobrecarga depende directamente de la temperatura de operación. De ahí nace el estudio del comportamiento del núcleo de los transformadores de medida comercial en condiciones de saturación.

1. CAPÍTULO UNO: GENERALIDADES DE LOS TRANSFORMADORES PARA MEDICIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA

El transformador eléctrico es uno de los desarrollos más importantes en la historia de la humanidad, desde que se observaron los primeros fenómenos electromagnéticos que sin saberlo descubriría Michael Faraday. El experimento consistía en dos bobinas enrolladas una sobre la otra y, al variar la corriente que pasaba por una de ellas, abriendo y cerrando un interruptor se hacía variar la corriente y, por consiguiente, se hacía variar el flujo magnético a través del tiempo. Con esto consiguió inducir una corriente eléctrica en el segundo devanado.

Hoy en día el transformador eléctrico es una pieza importante en un sistema eléctrico de potencia, para elevar los niveles de tensión suficientes para transmitir grandes cantidades de potencia a largas distancias con la menor cantidad de pérdidas. Así también es importante en un sistema eléctrico de distribución para reducir los niveles de tensión de transmisión a niveles de tensión útiles para el consumo en la industria, comercio y áreas residenciales.

Los transformadores eléctricos son máquinas eléctricas estáticas utilizadas con corriente alterna, construidas básicamente por dos enrollamientos de conductor llamados bobinados o devanados, cuya función es transformar los valores de corriente y voltaje a otros valores diferentes. Los transformadores son útiles para reducir o aumentar la tensión de un circuito eléctrico de corriente alterna manteniendo la potencia.

1.1. Partes de un transformador eléctrico para medida

Un transformador eléctrico para medida consta de las siguientes partes fundamentales:

- Devanados primario y secundario
- Núcleo
- Encapsulado
- Terminales

Cada uno de los elementos antes descritos juegan un papel importante en la construcción del transformador eléctrico, cabe resaltar que un transformador eléctrico de medida para niveles de tensión iguales o mayores a 69 kV puede tener varios devanados; a la vez esto dependerá de las necesidades con las cuales son diseñados y fabricados.

Un devanado o bobina es un arrollamiento de conductor de cobre, el cual se encuentra aislado. En algunos casos es un esmalte que se encarga de aislar la corriente entre espiras y en otros casos se utilizan aislamientos mucho más resistentes para niveles de tensión altos. Dichos conductores varían en su calibre dependiendo del diseño general del transformador y la capacidad de transferencia de potencia, y también puede variar la sección del conductor, pero esto dependerá de la forma en que son producidos en fábrica los devanados.

1.1.1. Devanado primario y secundario

Un transformador eléctrico está compuesto por dos circuitos eléctricos, los cuales son el devanado primario y secundario. Se le denomina devanado primario al devanado que se conecta a la fuente y recibe de primera mano la

energía. Este devanado puede ser fabricado únicamente con un conductor o una barra, en cuyo caso se establece que el número de espiras N_1 es igual a la unidad es decir $N_1 = 1$. En ningún caso se tendrá que el devanado primario será de cero espiras, esto debido a que se requiere de un devanado de por lo menos una espira para generar un flujo magnético. Esto es claramente deducible en la siguiente ecuación, estableciendo que $N_1 = 0$, se tendría que la tensión inducida sería 0:

$$e = -N_1 \frac{d\phi_B}{dt} = -(0) \frac{d\phi_B}{dt} = 0$$

Lo anterior indica que es imposible no tener un devanado primario, ya que este es de vital importancia debido a que genera el flujo magnético. Existen transformadores de corriente que no poseen devanado primario, esto debido a que el conductor propiamente del cual se desea obtener una medición de corriente sirve como devanado primario con $N_1 = 1$. A estos se les conoce como transformadores de corriente tipo ventana.

El devanado secundario es al que a través del flujo magnético variante en el tiempo se le induce un voltaje, y es a este devanado al cual se conectan las cargas según el tipo de transformador. Al momento de conectar una carga en el devanado secundario se crea una corriente para alimentar la carga, la cual produce un campo magnético opuesto al creado por el devanado primario, provocando un efecto desmagnetizante. Es por esta razón que cuando se trata de transformadores de medida es muy importante tomar en cuenta cuál es la carga máxima (burden máximo) que se puede conectar en el devanado secundario, sin causar un error en la medición de la variable eléctrica.

Figura 1. **Transformador de corriente para baja tensión tipo ventana**



Fuente: ABB. Instrument transformer reference guide.

1.1.2. Núcleo

El transformador eléctrico también posee un circuito magnético compuesto por el núcleo. El núcleo del transformador es de vital importancia, ya que este elemento es el encargado de aprovechar el flujo magnético creado por el bobinado primario al máximo para lograr una inducción de voltaje óptimo. Sin embargo, siempre existen pérdidas en el flujo por dispersión en el núcleo, debido a la geometría del mismo y por el calentamiento en el núcleo debido a corrientes parásitas que son inducidas en el hierro del núcleo.

El núcleo se fabrica con materiales ferromagnéticos, los cuales poseen grandes imanaciones aun en presencia de campos muy débiles. Comúnmente se utiliza hierro al silicio, el cual consiste en una aleación de hierro puro con 1-4 % de silicio. Con dicha aleación, al ser tratada térmicamente de forma adecuada, se obtiene un material cuyas propiedades magnéticas son mejores comparadas con el hierro, ya que posee una resistencia mayor y es más susceptible para campos magnéticos.

En cuanto a las disposiciones físicas del núcleo, son fabricados a base de delgadas láminas (ver figura 1), recubiertas con un barniz aislante, esto con el fin de reducir pérdidas debidas a corrientes generadas en el hierro por tensiones inducidas dentro del núcleo debido al campo magnético.

1.1.3. Encapsulado

El encapsulado es el medio aislante que se utiliza para proteger el núcleo y los bobinados, dándole así a los transformadores de instrumento rigidez eléctrica y mecánica. Así también, la geometría del encapsulado brinda lo que son las libranzas necesarias para cada nivel de tensión, para así evitar lo que son arcos eléctricos. La forma en que los transformadores son encapsulados varia de un fabricante a otro, así como varían los encapsulados dependiendo del nivel de tensión para los cuales son fabricados.

Los encapsulados para transformadores de baja y media tensión están fabricados de polímeros y epoxi que según el lugar de su instalación variará el material con el que se fabrican, ya que en el exterior los materiales aislantes con que se fabrican los encapsulados deben soportar las condiciones climáticas y de contaminación. Los transformadores de medida para baja y media tensión pueden ser instalados en interiores o exteriores.

1.1.4. Terminales

Los transformadores, dependiendo de su construcción, pueden tener únicamente dos terminales en los casos de transformadores tipo ventana, ya que únicamente poseen terminales secundarias, ya que estos basan su medición mediante la inducción del conductor del cual se desea obtener la medición.

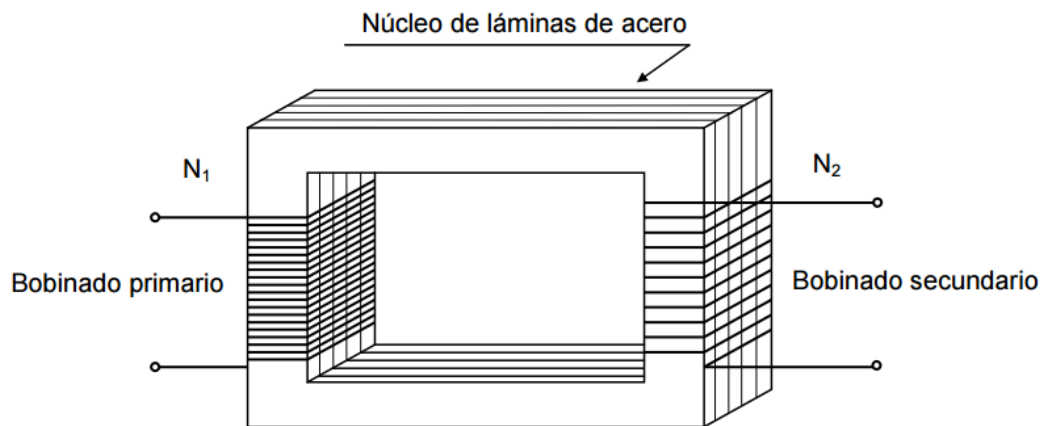
En el caso del transformador que posee una barra primaria se tendrán dos terminales primarias y, según el diseño, se pueden tener dos o más terminales secundarias en el caso que se posea un transformador de corriente con más de una relación de transformación.

1.2. Principio de funcionamiento del transformador ideal

El transformador ideal es un transformador hipotético que difiere más o menos del transformador real, este transformador es útil exclusivamente para fines de cálculo, análisis, enseñanza y aprendizaje, ya que hace referencia a un circuito equivalente de un transformador. En este tipo de transformador se desprecian las pérdidas producidas por la resistencia de los devanados y las pérdidas producidas para magnetizar el núcleo.

Un transformador eléctrico ideal consta de un devanado de entrada y un devanado de salida, en su forma más simple consta de un bobinado o devanado primario, uno secundario y un núcleo.

Figura 2. **Partes de un transformador en su forma más simple**



Fuente: *Partes de un transformador*. <https://www.frba.utn.edu.ar>

Consulta: 19 de febrero de 2017.

El funcionamiento de un transformador es consecuencia del fenómeno electromagnético, es decir, una corriente alterna que se hace circular a través del bobinado primario produce un campo magnético que a través del núcleo hace concatenar dicho flujo con el bobinado secundario. Al fenómeno de producir un voltaje en el bobinado secundario únicamente con el flujo magnético y sin conexión eléctrica se le llama inducción, ya que a través del campo magnético se le está induciendo un voltaje al bobinado secundario.

Lo anterior lo define la ley de inducción Faraday-Lenz, la cual establece que un voltaje inducido en una espira cerrada es directamente proporcional a la rapidez con la que cambia el flujo magnético en el tiempo a través de la espira. Expresado de forma matemática se tiene que:

$$e = -\frac{d\phi_B}{dt}$$

En donde " e " es el voltaje inducido y $d\phi_B/dt$ es la razón de cambio del flujo magnético respecto al tiempo. En otras palabras, la derivada de la función de flujo magnético respecto al tiempo.

El signo negativo en la formulación anterior se debe al hecho de que el voltaje inducido tiende a producir una corriente que a su vez produce un campo magnético opuesto al campo existente producido por la corriente original.

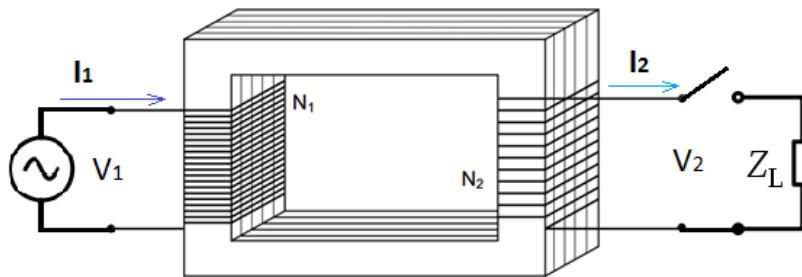
Cuando se posee una bobina con N espiras o vueltas de conductor la ecuación se convierte en:

$$e = -N \frac{d\phi_B}{dt}$$

1.2.1. Ecuaciones básicas que definen el comportamiento de un transformador

Al aplicarle un voltaje variante en el tiempo al bobinado primario de un transformador se producirá una corriente variante en el tiempo, que a su vez producirá un flujo magnético variante también en el tiempo, flujo que a través del núcleo enlazará al bobinado secundario, produciendo así en el bobinado secundario un voltaje inducido.

Figura 3. Transformador eléctrico con sus variables eléctricas



Fuente: Transformador eléctrico. <https://www.frba.utn.edu.ar>. Consulta: 19 de febrero de 2017.

El transformador mostrado en la figura 2 posee un bobinado primario con N_1 espiras y un bobinado secundario con N_2 espiras, adicional posee un voltaje primario (V_1) y un voltaje secundario (V_2). La relación de voltaje primario y secundario es directamente proporcional a la relación de números de espiras del bobinado primario y secundario; de forma matemática se tiene:

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{N_1}{N_2}$$

También existe una relación de corrientes eléctricas, la cual es inversamente proporcional a la relación de voltajes y de número de espiras, expresado de forma matemática se tiene que:

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{N_1}{N_2} = \frac{I_2}{I_1}$$

1.2.2. Relación de transformación

Ahora se introducirá el concepto de relación de transformación, el cual es únicamente un valor numérico adimensional muy útil para el cálculo de diversas variables que intervienen en el transformador eléctrico. La relación de transformación se denominara con la letra a y de forma matemática es:

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{N_1}{N_2} = \frac{I_2}{I_1} = a$$

La relación que existe entre voltaje primario (V_1) y voltaje secundario (V_2) indica el incremento o decremento que sufre el valor de voltaje en la salida respecto al valor de voltaje en la entrada. En la siguiente tabla se muestra los diferentes tipos de relación de transformación que se tienen:

Tabla I. Interpretación de la relación de transformación

RELACIÓN	TIPO DE TRANSFORMADOR
$a > 1$	Transformador reductor
$a = 1$	Transformador aislador
$0 < a < 1$	Transformador elevador

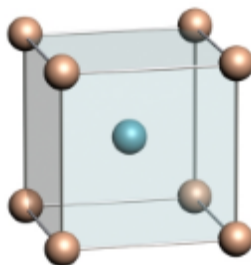
Fuente: elaboración propia.

En la práctica a la relación de transformación también se le conoce como relación teórica, ya que existen factores tales como las pérdidas debido a la magnetización del núcleo y las pérdidas debido a la impedancia generada por los bobinados. Lo anterior introduce cierto factor de error en la relación de transformación.

1.2.3. Curva de magnetización del núcleo

Dado que los núcleos de los transformadores son fabricados con materiales ferromagnéticos, estos materiales están constituidos a partir de átomos que por naturaleza poseen un momento magnético resultante del movimiento de los electrones alrededor del núcleo (donde se encuentran los protones y neutrones), el movimiento del electrón sobre su propio eje y el movimiento del núcleo sobre su propio eje. Los átomos en un material ferromagnético se encuentran ordenados de forma cristalina (ver figura 4).

Figura 4. Estructura cristalina cúbica centrada en el interior del hierro

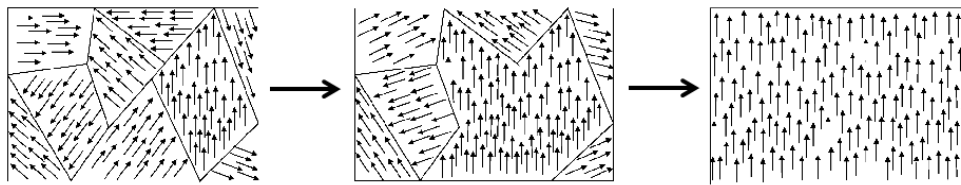


Fuente: *Estructura cristalina cúbica*. http://www.mim-us.es/estructuras_cristalinas/estructuras_tipicas.html. Consulta: 9 de marzo de 2017.

Adicional a las estructuras cristalinas en las que se encuentran los átomos, se encuentran los dominios magnéticos que son agrupaciones de

dipolos magnéticos. Un dominio magnético puede aparecer en un material en el que se dé un ordenamiento magnético a medio alcance.

Figura 5. **Esquema de dominios magnéticos de un material ferromagnético alineándose con un campo creciente**

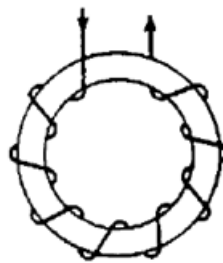


Fuente: *Esquema de dominios magnéticos.*

https://es.wikipedia.org/wiki/Dominio_magn%C3%A9tico. Consulta: 9 de marzo de 2017.

El proceso de magnetización puede comprenderse de mejor forma cuando se analiza la curva de magnetización del núcleo de un transformador. La curva de magnetización también es conocida como la curva de histéresis. Para ejemplificar la curva de histéresis se requiere poder magnetizar un material ferromagnético con un campo magnético variable en el tiempo y para ejemplificarlo de mejor manera se utilizará un material ferromagnético en forma de anillo toroidal en el cual se devanará un conductor como en la figura 6.

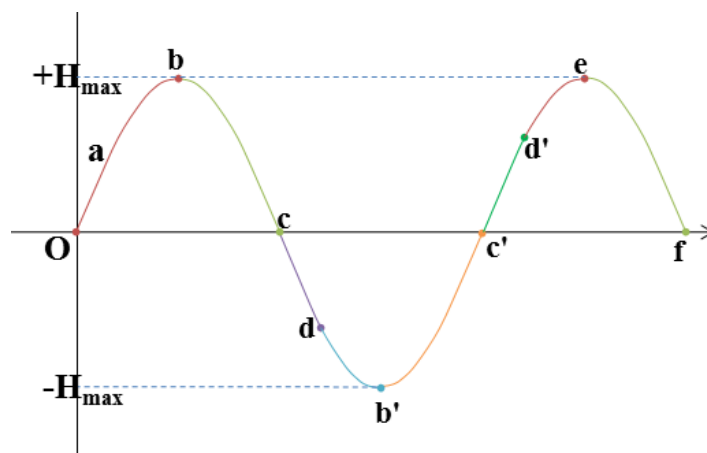
Figura 6. **Anillo toroidal en el cual se devana un conductor**



Fuente: E.E. STAFF M.I.T. Circuitos magnéticos y transformadores.

Se varía el campo magnético variando la intensidad de corriente que circula por el devanado. El material ferromagnético se halla desimantado inicialmente. Se mide la inducción magnética B por un método apropiado en función del campo magnético H para valores de H crecientes hasta un máximo $+H_{max}$ (ver gráfica 7) y se representa gráficamente la relación, se obtiene una curva análoga a la Oab de la figura ocho, a este segmento de curva se le denomina curva de primera imanación.

Figura 7. **Gráfico de la variación del campo magnético en el tiempo**



Fuente: elaboración propia.

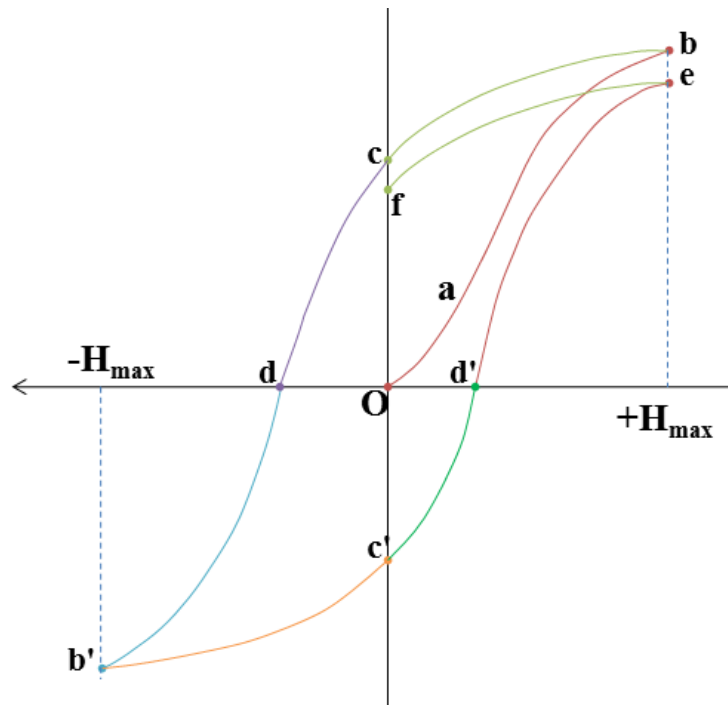
Ahora, si se disminuye el valor de H , se encuentra otra relación entre B y H tal y como lo representa la curva de la figura ocho en el segmento bc , el cual queda por encima de la curva de la primera imanación. Obsérvese que en la figura siete se observa también el segmento de curva bc correspondiente a la onda del campo magnético H . Hasta este momento no existe un campo magnético según la figura siete, sin embargo, en la figura ocho se observa que en el núcleo queda una inducción magnética representada por Oc en la gráfica. A esta inducción magnética se le llama magnetismo remanente o remanencia.

Para anular la inducción magnética se precisa aplicar un campo magnético en sentido contrario al del campo magnético aplicado inicialmente, en la gráfica siete se observa en el segmento de onda cd ; a este campo se le conoce como campo coercitivo.

Haciendo H más negativo hasta que alcance un valor $-H_{max}$, la relación entre B y H sigue la curva db' . Si se aumenta luego H desde $-H_{max}$ hasta $+H_{max}$ pasando por cero, la curva de la figura ocho sigue el camino $b'c'd'e$. Al seguir haciendo variar H según ciclos idénticos adicionales, el camino tiende a una curva fija. Después de muchos ciclos, la curva se convierte en un lazo cerrado.

Si los valores de positivos y negativos de H_{max} son iguales, el lazo es simétrico respecto al origen. Luego, el material tiene la propiedad de tender a oponerse a la variación de inducción magnética. A esta propiedad se le da el nombre de histéresis, término que significa retraso. El lazo cerrado obtenido cuando el campo magnético va tomando todos los valores correspondientes a un ciclo cerrado recibe el nombre de ciclo de histéresis.

Figura 8. **Curva de histéresis para una muestra inicialmente desimanada**



Fuente: elaboración propia.

1.3. Aspectos fundamentales de los transformadores de corriente

En las instalaciones eléctricas existe la necesidad de conectar aparatos de medida y frecuentemente las magnitudes que hay que medir son elevados niveles de tensión, elevados niveles de corriente o concurren ambas circunstancias. Es por ello que casi al mismo tiempo que se iniciaba el uso de la corriente alterna nacieron los transformadores de medida. Los inconvenientes de la medición de altos niveles de tensión y corriente se resuelven con conducir magnitudes proporcionales a las originales pero con valores más manejables. Los transformadores de medida más comunes son los transformadores de

medida inductivos. Con sus primarios conectados en alta o baja tensión según corresponda, transforman las magnitudes que se desean medir, en corrientes y tensiones moderadas en el secundario. Tales corrientes y tensiones se conducen económicamente con conductores de secciones reducidas y aislamientos más baratos para los medidores que ya se encuentran normalizados.

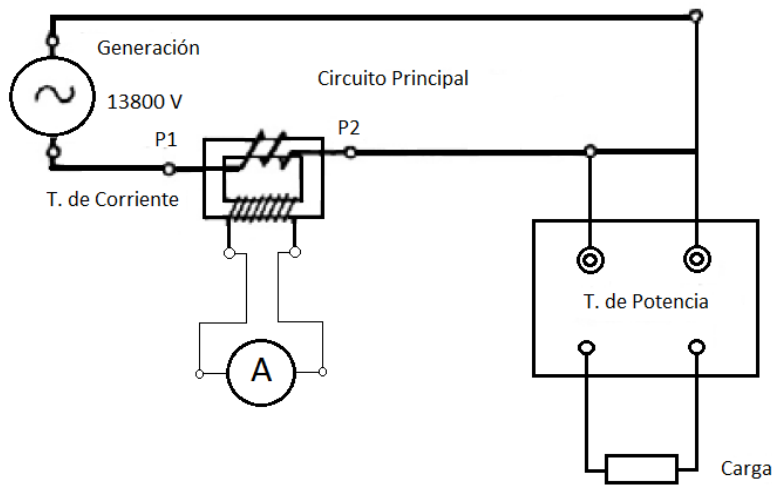
Para ejemplificar lo anteriormente expuesto, supóngase la necesidad de medir corrientes con intensidades del orden de los 800 A, en baja tensión; las dificultades se observan a simple vista. La instalación directa de un amperímetro obligaría a un aparato grande difícilmente compatible con los requerimientos de exactitud y precisión. Pero, además, no deben olvidarse las posibilidades magnéticas que tan fuertes corrientes pueden motivar en los aparatos de medición. Finalmente, en caso de cortocircuito en la instalación, se crearían considerables esfuerzos dinámicos que tendrían que soportar los delicados medidores de energía.

Los objetivos principales de la instalación de los transformadores de medida son los siguientes:

- Aislar o separar los circuitos y aparatos de medida, protección, etcétera, de la alta tensión.
- Evitar perturbaciones electromagnéticas de las corrientes fuertes y reducir corrientes de cortocircuito a valores admisibles en los delicados aparatos de medida.
- Obtener intensidades de corriente o tensiones proporcionales a las que se desea medir y transmitir las a los aparatos apropiados.

El devanado primario en un transformador de corriente debe tener el aislamiento adecuado para la tensión a la cual esté diseñado, para baja tensión hasta 600 V y en media tensión aislamientos desde los 5 kV hasta los 36 kV.

Figura 9. **Uso del transformador de corriente para medida en una instalación eléctrica**



Fuente: RAS OLIVA, Enrique. Transformadores de potencia, de medida y de protección.

En la figura 9 se observa el uso del transformador de corriente en un sistema eléctrico de potencia. Cabe resaltar que el devanado primario del transformador de corriente debe ser conectado en serie en relación con el circuito principal de donde se desea obtener la medición de corriente. En el caso de las impedancias colocadas en el secundario que también se conocen como el burden del transformador de corriente, son bobinas amperimétricas con bajos valores de corriente. Cabe resaltar que el transformador de corriente, a diferencia de un transformador monofásico de potencia, por el primario circula una corriente la cual es independiente de la carga que tenga conectada en el secundario.

2. IMPORTANCIA DE LA EXACTITUD EN LOS TRANSFORMADORES DE CORRIENTE

La importancia de los transformadores de medida está en la exactitud con la que estos pueden medir las variables eléctricas deseadas, tales como la corriente y el voltaje, sin embargo, el valor de una magnitud determinado por un instrumento de medida siempre tendrá un error debido a factores que dependen propiamente de la construcción y los materiales con que se fabriquen. La diferencia entre el valor medido y el valor real se denomina error y se expresa en unidades de la magnitud correspondiente (error absoluto) o en porcentaje de un valor de referencia (error relativo en porcentaje del límite superior del rango de medida; en porcentaje del valor medido; en porcentaje del valor correcto).

Cabe resaltar que la exactitud de una medición específica es la diferencia entre el valor medido y el valor real de una cantidad. La desviación del valor verdadero es un índice de qué tan exactamente se ha llevado a cabo una lectura. Por otro lado, la precisión especifica la repetitividad de un conjunto de lecturas, hecha cada una en forma independiente con el mismo instrumento. Se determina una estimación de la precisión mediante la desviación de la lectura con respecto al valor promedio.

Es muy importante estudiar el comportamiento de la exactitud de los transformadores de corriente para la correcta selección e instalación de los mismos, con el fin de que estos equipos realicen correctamente el trabajo para el cual fueron diseñados.

2.1. Clases de exactitud comerciales

Los transformadores de corriente se clasifican por la exactitud con la que estos pueden tomar las medidas. La exactitud de un transformador de corriente está definido por un número decimal de dos cifras, el cual indica el porcentaje de exactitud del transformador de corriente (TC), por ejemplo, un TC con clase de exactitud 0,3 indica que las medidas obtenidas en el secundario del TC tendrán una incerteza en la medida de 0,3 %, lo que indicaría que los valores de medida estarán entre un 99,997 % o un 1,003 % del valor medido. Las clases de exactitud normadas y comerciales son 0,3, 0,6 y 1,2, sin embargo, en la actualidad existen los transformadores de rango extendido o de alta exactitud, cuyas clases de exactitud para transformadores de corriente son 0,15 y 0,15s; y para el caso de los transformadores de voltaje únicamente es 0,15.

La exactitud de los transformadores de corriente se rige por la norma IEEE C57.13 y la norma C57.13.6, la cual establece las diferentes clases de exactitud. Las clases de exactitud que se utilizan comercialmente se muestran en la siguiente tabla:

Tabla II. Clases de exactitud comerciales

Clases de exactitud		0.15s	0.15	0.3	0.6	1.2
Al 5% de la capacidad del CT	Mínima	0.9985	0.9970	N/A	N/A	N/A
	Máxima	1.0015	1.0030	N/A	N/A	N/A
Al 10% de la capacidad del CT	Mínima	N/A	N/A	0.997	0.994	0.988
	Máxima	N/A	N/A	1.003	1.006	1.012
Al 100% de la capacidad del CT	Mínima	0.9985	0.9985	0.994	0.988	0.976
	Máxima	1.015	1.015	1.006	1.012	1.024

Fuente: elaboración propia, con datos de las normas ANSI/IEEE C57.13 y C57.13.6

La clase de exactitud 0.15s es una clase de exactitud superior, en la cual el transformador de corriente alcanza la exactitud 0,15 % cuando por el primario pasa una corriente correspondiente al cinco por ciento de la capacidad nominal y esta exactitud se mantiene hasta el factor de corriente térmica continua del transformador de corriente.

En Guatemala la Norma Técnica del Servicio de Distribución –NTSD– en su capítulo dos indica: “Calidad Del Servicio Comercial Del Distribuidor”, artículo 64, inciso C, establece que la exactitud de transformadores de medición y medidores, para usuarios con demandas de potencia menores a 11 kW, el error máximo es del 3 % y para usuarios con demandas de potencia superiores a los 11 kW, el error máximo es 2 %. Por otra parte, la Norma de Coordinación Comercial Numero 14 –NCC14–, la cual rige a los grandes usuarios, estipula que la clase de exactitud de los transformadores de corriente y voltaje no debe exceder el 0,3 %.

2.2. Comportamiento de la exactitud de transformadores de corriente

La exactitud de un transformador de corriente depende de cuatro aspectos muy importantes, los cuales son:

- Los amperios-vuelta relacionados a la cantidad de vueltas del devanado secundario.
- La carga conectada en el circuito secundario del transformador de corriente.
- La construcción de los devanados, ya que la resistencia afecta la cargabilidad total del secundario.
- El material con el que se construye el núcleo.

Un transformador de corriente es diferente a otros transformadores en muchos aspectos. El primario es conectado en serie a la carga, esto significa que las corrientes primarias y secundarias son rígidas y no se ven afectadas por la carga del secundario. Las corrientes son las cantidades principales y las caídas de voltaje son solo de interés debido a la corriente de excitación y los núcleos de medida.

La relación de transformación del transformador de corriente (RTC) está dada por la siguiente ecuación:

$$RTC = \frac{I_P}{I_S} = \frac{N_s}{N_P} = \frac{I_1}{I_2} = \frac{N_2}{N_1}$$

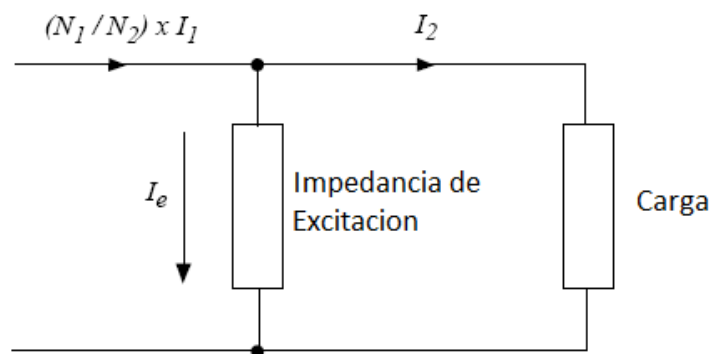
Siendo I_P la corriente que circula en el devanado primario, así como también I_S será la corriente que circula por el devanado secundario, de modo que la relación entre la corriente primaria y corriente secundaria se le conoce como relación de transformación teórica. En algunas literaturas también se reconoce I_1 como la corriente que circula por el devanado primario, así como también I_2 como la corriente que circula por el devanado secundario. De la misma forma N_1 el número de espiras del devanado primario y N_2 el número de espiras del devanado secundario.

Si fuese posible desprestigiar la corriente de excitación el transformador de corriente debería reproducir la corriente primaria sin errores y la siguiente ecuación debería aplicarse a las corrientes primaria y secundaria:

$$I_2 = \frac{N_1}{N_2} \cdot I_1$$

Sin embargo, no es posible despreciar la corriente de excitación, ya que esta debe ser lo menor posible, puesto que incide directamente en el porcentaje de exactitud del transformador de corriente. En la figura 10 se observa el circuito equivalente simplificado de un transformador de corriente trasladado al secundario.

Figura 10. **Circuito equivalente simplificado de un TC**



Fuente: ABB. Application guide, instrument transformers. Edition 3, 2009-09.

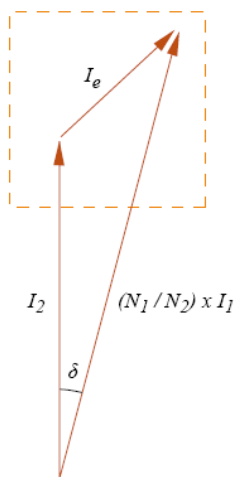
El diagrama anterior muestra claramente que no toda la corriente circula por el circuito secundario. Parte de la corriente primaria es consumida por el núcleo, esto quiere decir que la corriente primaria no se reproduce exactamente en el circuito secundario. La relación entre corrientes para este caso es:

$$I_2 = \frac{N_1}{N_2} \cdot I_1 - I_e$$

En un transformador de corriente ideal la corriente secundaria es inversamente proporcional a la relación de espiras y opuesta en fase a la corriente primaria. En realidad una proporcionalidad inversa y una relación de

fase no son posibles porque parte de la corriente primaria debe ser útil para excitar el núcleo. Para encontrar la cantidad restante para suministrar corriente secundaria, la corriente de excitación debe ser sustraída fasorialmente de la corriente primaria. Por lo tanto, la corriente secundaria será ligeramente diferente al valor de la relación de espiras indicada y hay un ligero cambio en la relación de fase. Como resultado se introduce el error de relación y el error de fase de ángulo.

Figura 11. **Diagrama vectorial de los errores de fase y de amplitud**



Fuente: ABB. Application guide, instrument transformers. Edition 3, 2009-09.

2.2.1. Error de relación

El error en la medición de corriente es de dos tipos: el error de amplitud de la corriente secundaria y el error por el desfase provocado por la I_e . El error en la amplitud de corriente se llama error de relación (η) y el error debido al desfase se llama error de ángulo. El error de relación se calcula de forma porcentual mediante la ecuación:

$$\eta = \frac{RTC \cdot I_S - I_P}{I_P} \cdot 100$$

Donde I_S e I_P son los valores eficaces de las corrientes y RTC la relación nominal. Por ejemplo, se tiene un transformador de corriente cuyos datos de placa indican que tiene una RTC de 25:5 y una clase de exactitud de 0,15, y al introducir 25 amperios en el primario (I_P) se obtuvo una medida de corriente secundaria de 4,998509 amperios (I_S); por consiguiente el error de relación (η) será:

$$\eta = \frac{25/5 \cdot (4.998509) - 25}{25} \cdot 100 = -0.02982 \%$$

El error de relación de un transformador de corriente se expresa normalmente por medio de un factor de corrección de la relación (FCR), que se define como:

$$FCR = \frac{\text{relacion de transformacion real}}{\text{relacion de transformacion nominal}}$$

La relación de transformación real se da entre los valores medidos de la corriente primaria y secundaria. La relación de transformación nominal se da entre los valores nominales de ambas corrientes.

2.2.2. Error de ángulo de fase

El error de ángulo de fase o simplemente error de ángulo es otro error que se introduce en la medida de corriente realizada con transformadores de corriente. Se define como la diferencia de fase entre la corriente primaria y secundaria; dicho desfase de ángulo puede ser positivo si el vector de la

corriente secundaria está en adelanto con respecto al vector de la corriente primaria; o puede ser negativo si está atrasado.

El error de ángulo de fase (ε) normalmente se expresa en minutos. De este error se deriva el concepto de factor de corrección del ángulo de fase ($k\varepsilon$), que se define como el factor por el cual se debe multiplicar el factor de potencia indicado en el devanado secundario del TC, para de esta manera conocer el verdadero factor de potencia de carga medida. A continuación se presentan algunas ecuaciones útiles para el cálculo del factor de corrección del ángulo de fase:

$$k\varepsilon = \frac{\cos\theta_p}{\cos\theta_s} = \frac{\cos(\theta_s + \varepsilon)}{\cos\theta_s} = \frac{\cos\theta_p}{\cos(\theta_p - \varepsilon)}$$

Donde ε es el error de ángulo de fase, θ_p es el factor de potencia real del sistema, θ_s es el factor de potencia aparente medido en el secundario del transformador.

Luego de obtener lo que es el factor de corrección de relación y el factor de corrección del ángulo de fase se puede calcular el factor de corrección de transformación (FCT) mediante la siguiente ecuación:

$$FCT = FCR \cdot k\varepsilon$$

El factor de corrección de transformación (FCT) se define como el factor por el cual se debe multiplicar la relación nominal de transformación para corregir los errores introducidos por un transformador de instrumento en la medición de la potencia o de energía. Es muy importante que en la medición de

las aplicaciones para protección no se requiera de gran exactitud, por lo que se desprecia el error de ángulo y solo se considera el error de relación.

2.2.3. Efecto de la carga secundaria en la relación y ángulo de fase

Un incremento en la carga en el secundario de un transformador de corriente significa un incremento de la impedancia del burden, si la corriente secundaria se mantiene constante. El aumento de la corriente secundaria requiere un aumento del voltaje inducido que solo puede producirse mediante un aumento de flujo. Para que se pueda incrementar el flujo, la corriente de magnetización se debe incrementar y, por lo tanto, la corriente por pérdidas en el núcleo también aumentará. Esto da como resultado un incremento de la corriente de excitación. Por lo tanto un incremento en la carga provoca un aumento de la corriente de excitación. Dado que la corriente de excitación es la causa principal de los errores de relación y de ángulo de fase en el transformador de corriente, estos errores se ven afectados por cualquier cambio en la carga secundaria.

2.2.4. Efecto de la corriente primaria en la relación y ángulo de fase

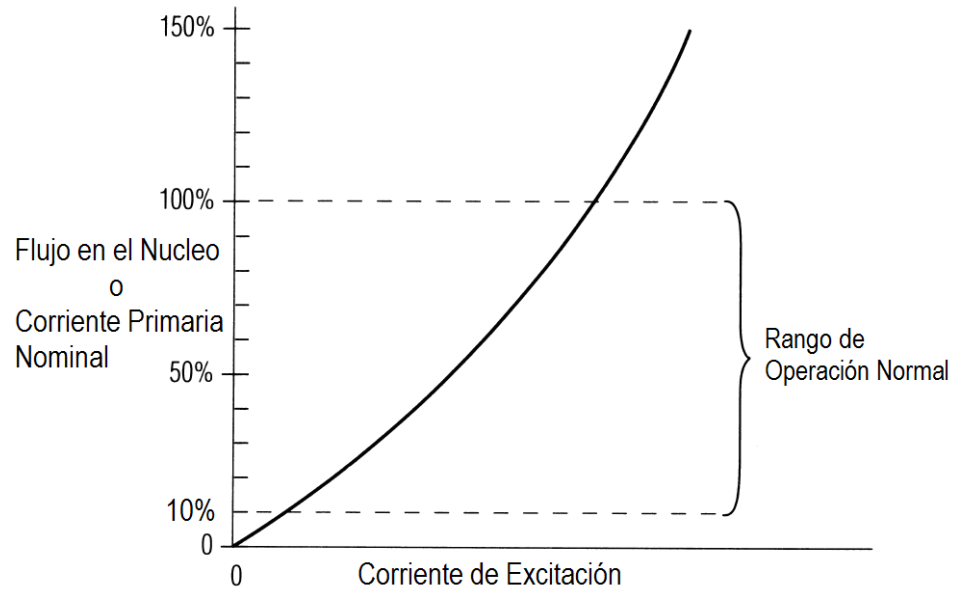
A diferencia de un transformador de potencia que opera prácticamente a un voltaje primario constante, el transformador de corriente debe operar sobre un amplio rango de corrientes primarias que van desde cero hasta la corriente nominal, y superior a la corriente nominal en casos especiales, tales como el funcionamiento de los relés de protección. Esto significa que, con un burden secundario constante, el flujo en el núcleo debe variar en un amplio rango a medida que se cambia la corriente primaria.

Para producir esta variación en el flujo, la corriente de excitación debe variar en un amplio rango. Si el flujo φ varía en proporción exacta con la corriente de excitación I_E , entonces los cambios en la corriente primaria no afectarían la relación y el ángulo de fase. Sin embargo, los transformadores de corriente están diseñados para funcionar a densidades de flujo bajas en el núcleo y bajo estas condiciones el flujo no es directamente proporcional a la corriente de excitación. La figura 12 muestra una curva de corriente de excitación típica para el núcleo magnético de un transformador de corriente.

Obsérvese que el cambio en la corriente de excitación, en el rango de funcionamiento normal de 10 a 100 % de la corriente primaria nominal, no es una función lineal de la corriente primaria. Con cargas secundarias normales, la saturación no se produce hasta que la corriente primaria alcance de 5 a 20 veces el valor nominal.

Dado que la corriente de excitación no cambia en proporción exacta con la corriente primaria, la relación verdadera y el ángulo de fase varían hasta cierto punto con la corriente primaria. Es importante hacer énfasis en que los errores de relación y de ángulo de fase son generalmente mayores al 10 % de corriente primaria y al 100 % de la corriente primaria, aunque esto depende de la carga y de la compensación del transformador de corriente en particular. Por esta razón es importante el correcto dimensionamiento de los transformadores de corriente, ya que si es sobredimensionado el transformador de corriente es inexacto.

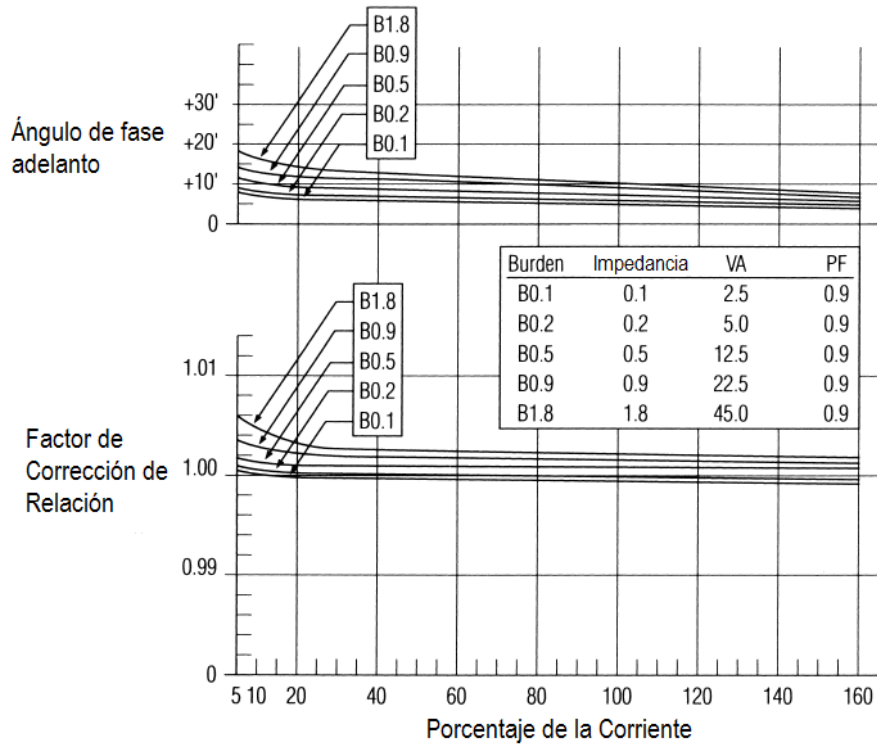
Figura 12. **Curva típica de corriente de excitación de un transformador de corriente**



Fuente: HARLEY GILLELAND Et Al. *Handbook for electricity metering*. p. 42.

La figura 13 muestra las curvas de exactitud de medición típicas para un transformador de corriente con clase de exactitud 0,3 con los diferentes burden normados en la IEEE y con un rango de corriente que va desde cinco por ciento hasta 160 %. Obsérvese que el error de ángulo de fase y de relación de un transformador típico es muy pequeño para el menor burden, esto se debe a que existe menos fuerza contra electromotriz en el núcleo del transformador de corriente, de manera que entre más burden se le adicione al transformador de corriente, menor será su exactitud. Además, los transformadores de corriente son mucho más exactos en un rango de corriente más amplio que el requerido por IEEE para una clase de exactitud de 0,3.

Figura 13. **Curva característica de relación y ángulo de fase para un transformador de corriente a 60 Hertz**



Fuente: HARLEY GILLELAND Et Al. *Handbook for electricity metering*. p. 43

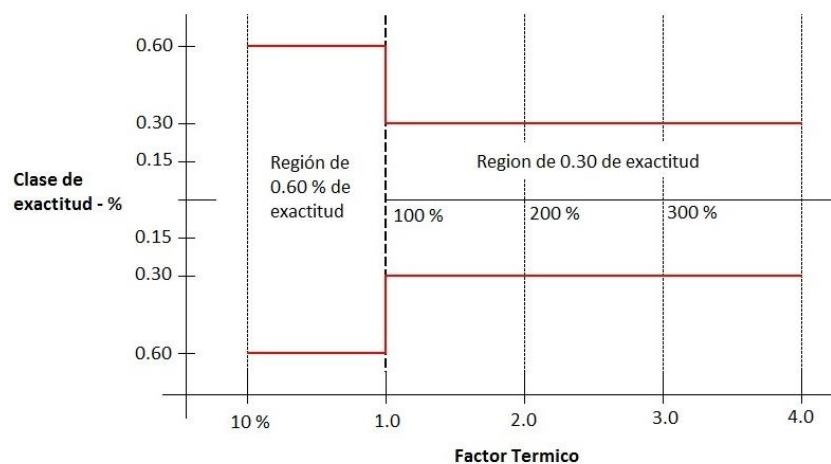
2.3. Transformadores convencionales y de rango extendido

Dependiendo el tipo de material con el cual se fabrican los núcleos de los transformadores de corriente para medida, se pueden encontrar en el mercado transformadores de corriente convencionales y transformadores de corriente de rango extendidos, ambos tienen curvas de magnetización distintas.

2.3.1. Transformadores de corriente convencionales

Hay dos fuentes de error en los transformadores de instrumento: error de relación y error de fase de ángulo. En un transformador, el error de medición es la combinación de dos errores por separado. Esta combinación se llama factor de corrección del transformador (TCF, por sus siglas en inglés). IEEE ha establecido las diferentes clases de exactitud para transformadores de corriente y potencial. En la figura 12 se muestra la prueba estándar que muestra el rendimiento del transformador de corriente al 10 % y 100 % de la corriente nominal. El límite de error permitido de la clase de exactitud de un transformador de corriente al 10 % de su capacidad es del doble, justo cuando el transformador de corriente llega al 100 % de su capacidad alcanza la clase de exactitud proporcionada por el fabricante. La figura 12 muestra los límites de rendimiento de una medida estándar de un transformador de corriente de 0,30 % de exactitud con un factor de corriente térmica continua de 4,0.

Figura 14. **Gráfica del túnel transformador de corriente clase 0,3**



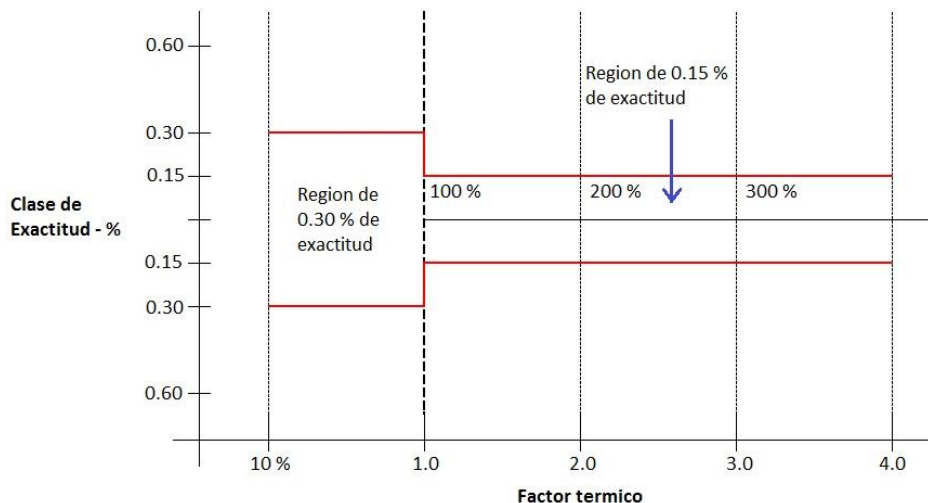
Fuente: elaboración propia, con base en Instrument transformer basic technical information and application publicado por GE.

2.3.2. Transformadores de corriente de alta exactitud o rango extendido

También existen transformadores de corriente de alta exactitud, cuyas clases de exactitud son 0,15 y 0,15s. Incluidos en el nuevo estándar de alta exactitud, son los nuevos puntos de prueba y cargas para verificar el rendimiento.

Los transformadores de corriente cuya clase de exactitud es 0,15 deben mantener una exactitud del 0,15 % de la corriente nominal hasta el factor de corriente térmica continua (RF). Con una corriente nominal desde el 5 % hasta el 100 %, el transformador de corriente debe mantener una precisión del 0,3 %. En estos tipos de transformadores de corriente el fabricante no garantiza ninguna exactitud a niveles inferiores al 5 %.

Figura 15. Gráfica del túnel transformador de corriente clase 0,15



Fuente: elaboración propia, con base en Instrument transformer basic technical information and application publicado por GE.

Los transformadores de corriente cuya clase de exactitud es 0,15s deben mantener una precisión del 0,15 % desde 5 % de la capacidad nominal del CT hasta la carga nominal, es decir el 100 % de la capacidad del CT. Los fabricantes no garantizan ninguna exactitud a niveles inferiores al 5 % de la capacidad del CT.

2.4. Gráfico del paralelogramo

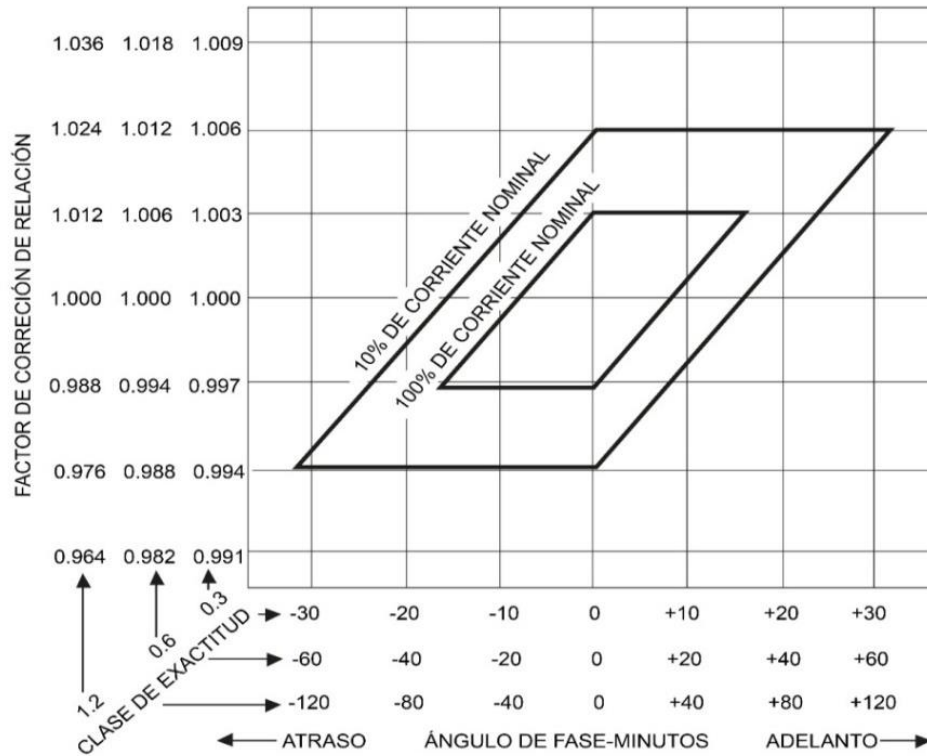
Dentro de las normativas de la IEEE, que rigen el funcionamiento de los transformadores de instrumento, se tiene que las diferentes clases de exactitud en los transformadores de corriente pueden mostrarse a través de un gráfico donde se colocan puntos dentro de un paralelogramo según las pruebas que se apliquen a un TC. Como se mostró anteriormente, los transformadores de corriente poseen dos errores importantes en la medición debida a la corriente de excitación: el error de fase de ángulo y el error de relación; y en este gráfico del paralelogramo se observan los puntos de exactitud para cada clase.

En el eje de las abscisas se encuentran los límites máximos y mínimos del error de fase de ángulo; en el eje de las ordenadas se encuentran los límites máximos y mínimos del error de relación. En la figura 16 se logra observar un gráfico con dos paralelogramos graficados que definen los límites superiores e inferiores admitidos para el error de relación y el error de fase de ángulo para transformadores de corriente cuyo rango de medida es normal, el de mayor tamaño es el que define los límites superiores e inferiores del error de relación y el error de fase de ángulo al 10 % de la capacidad nominal del transformador de corriente.

El paralelogramo interior define los límites superiores e inferiores del error de relación y de error de ángulo de fase, cuando el transformador de corriente ha alcanzado el 100 % de la capacidad del transformador de corriente.

Cabe resaltar que en la figura 16 se puede determinar que en un mismo transformador de corriente de rango normal se tienen dos tipos de exactitud, es decir, si en placa se observa que dicho transformador posee una clase de exactitud de 0,3, de cero por ciento hasta el 10 % se desconoce la exactitud (ver figura 12), al llegar al 10 % de la capacidad nominal se tiene que la exactitud es 0,6, esta exactitud aplica hasta el 100 % de la capacidad nominal. A partir del 100 % hasta el factor de corriente térmica continua se cumple la exactitud dada por la placa. Lo anterior se cumple para los transformadores de corriente de rango normal con clases de exactitud de 0,3, 0,6 y 1,2.

Figura 16. Límites de exactitud para transformadores de corriente clase 0,3, 0,6 y 1,2



Fuente: Norma IEEE C57.13.

En un laboratorio de calibración de transformadores de medida y en condiciones de humedad y temperatura controladas, se sometió a prueba un transformador de corriente. La prueba consistió en introducirle corrientes de prueba correspondientes al 10 %, 100 % y 400 % de la capacidad nominal del transformador de corriente. En cada una de las pruebas se obtuvo el factor de corrección de relación y el desplazamiento de fase en minutos. En la tabla III se observan los resultados obtenidos, en la primera fila se observa la prueba al 400 % de la capacidad nominal del TC y en las columnas de la derecha se observan los resultados.

Tabla III. **Puntos de medida según IEEE C57.13**

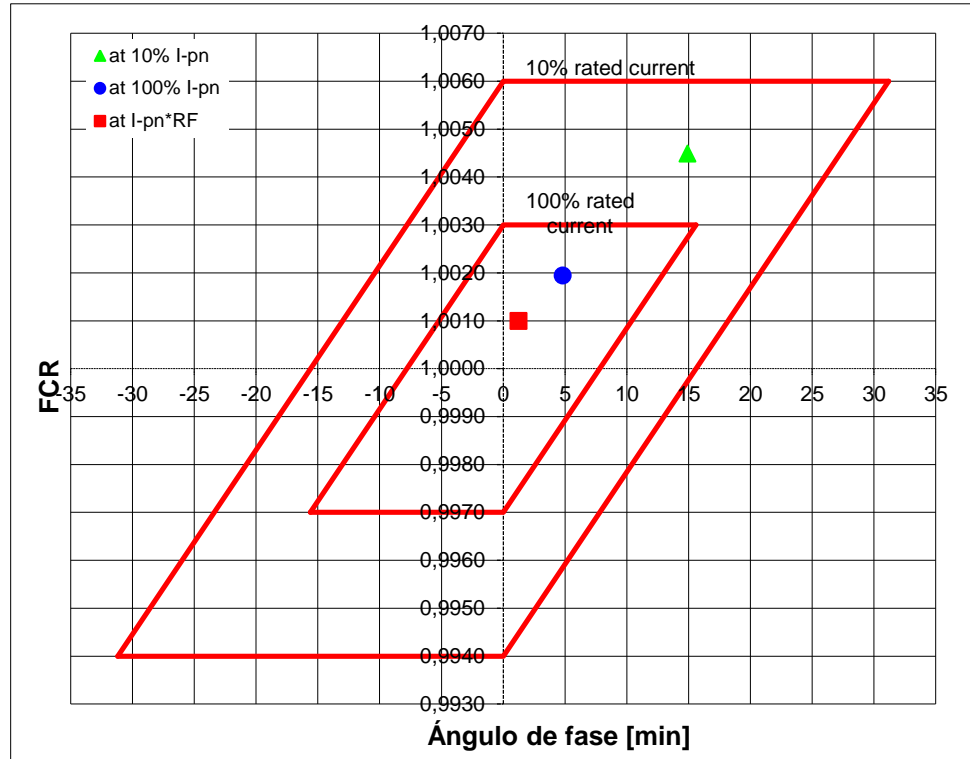
% de la corriente primaria	FCR medido	Desplazamiento de fase [min]
400.00%	1.0010	1.24
100.00%	1.0019	4.80
10.00%	1.0045	14.91

Fuente: resultados obtenidos de equipo calibrador de transformadores de corriente.

Con los datos obtenidos anteriormente se pueden graficar puntos específicos para cada prueba. En la figura 17 se observan los puntos graficados de las tres pruebas realizadas, el punto verde corresponde a los resultados obtenidos al 10 % de la capacidad nominal del transformador de corriente, el punto azul corresponde a los resultados al 100 % de la capacidad nominal y el punto rojo corresponde a los resultados obtenidos al 400 % de la capacidad nominal. Obsérvese que entre más corriente se introduce en el devanado primario del transformador de corriente, este es más exacto. Esto se debe al hecho de que las variables que inciden en la exactitud del transformador de corriente se vuelven prácticamente despreciables a medida que incrementa la corriente, cabe resaltar que la limitación de sobrecargar los transformadores de corriente es la capacidad de los materiales a soportar corrientes altas y estrés térmico debido al alto nivel de corriente.

Tal y como se apreciaba en las gráficas del túnel del apartado anterior, en el gráfico del paralelogramo se observa que la exactitud al 10 % (triángulo) de la capacidad nominal se encuentra entre el 0,3 y 0,6 aunque la placa indique que la clase sea 0,3. La exactitud 0,3 se alcanza al llegar al 100 % (círculo) de la capacidad nominal del transformador de corriente. Al llegar al factor de corriente térmica continua (cuadrado) se observa que es incluso más exacto.

Figura 17. Gráfico del paralelogramo de un transformador de corriente



Fuente: obtenido de un patrón calibrador de transformadores de corriente.

3. EFECTO DE LA TEMPERATURA EN LA EXACTITUD DEL TRANSFORMADOR DE CORRIENTE

Los transformadores de corriente sufren cambios en el flujo de corriente que se hace pasar por la barra primaria y en algunos casos son cambios abruptos dependiendo de la carga a la cual se desea medir. A diferencia de los transformadores de potencial que miden un nivel de tensión que varía levemente de un valor establecido, la corriente varía según el horario y la actividad de la carga; si en algunos casos la carga es incrementada de tal forma que supere la capacidad del transformador de corriente, dichos transformadores son sometidos a un incremento de calor debido a una alta corriente eléctrica. El calentamiento se debe directamente al choque de electrones de los átomos del material por el que circulan, a esto se le llama efecto Joule. Adicional a esto las condiciones de la instalación determinan la temperatura a la cual los transformadores de corriente son sometidos, por ejemplo, un equipo de medida con transformadores de corriente para baja tensión instalados en el secundario dentro de un transformador tipo pedestal (más comúnmente conocidos como transformadores *pad mounted*) que se encuentra a la intemperie, sufrirá una mayor temperatura en temporada alta de calor que unos instalados en el sótano de un edificio.

La temperatura en un transformador de corriente juega un papel muy importante, ya que la misma puede ser perjudicial para la exactitud de la medida como para el transformador de corriente propiamente. En un material donde se hace conducir una alta corriente se produce un alto nivel de calor, lo que indica que mayor es su energía cinética asociada a los movimientos de los electrones en dicho material, sea en un sentido de traslación, de rotación o en

forma de vibraciones. A medida que mayor sea la energía cinética, se observa que está más caliente, es decir, su temperatura es mayor.

En el sector eléctrico existen diversas aplicaciones para las cuales los transformadores de corriente son correctamente diseñados para las cargas a medir; por ejemplo, en una planta de generación de energía eléctrica se encuentra una subestación para elevar la tensión de generación a tensión eléctrica de transmisión. En dicha subestación son necesarios los transformadores de corriente, los cuales se encuentran correctamente dimensionados para la capacidad de generación de energía de la planta. Sin embargo, en distribución de energía se hace necesaria la instalación de transformadores de corriente con el fin de medir la energía eléctrica que le es suministrada a un usuario. En ocasiones, los usuarios debido al crecimiento de la industria incrementan cargas sin notificar al distribuidor, causando una sobrecarga a los transformadores de corriente utilizados para la medición de energía eléctrica. Por tal razón es necesario poseer transformadores de corriente robustos que puedan medir la corriente eléctrica aun cuando este esté sobrecargado hasta cierto nivel que permitan los materiales de construcción.

3.1. Factor de Corriente Térmica Continua (RF)

Los transformadores de corriente de baja y media tensión son fabricados para soportar corrientes mayores a las nominales para los cuales son fabricados sin perder exactitud ni dañarse; esta es una cualidad de los transformadores de corriente para baja y media tensión. El factor de corriente térmica continua es un concepto estandarizado por IEEE en su estándar C57.13 para transformadores de instrumento, el factor de corriente térmica continua es un valor numérico que establece cuánto más se puede sobrecargar el transformador de corriente sin dañarse y sin perder exactitud. Por ejemplo, un

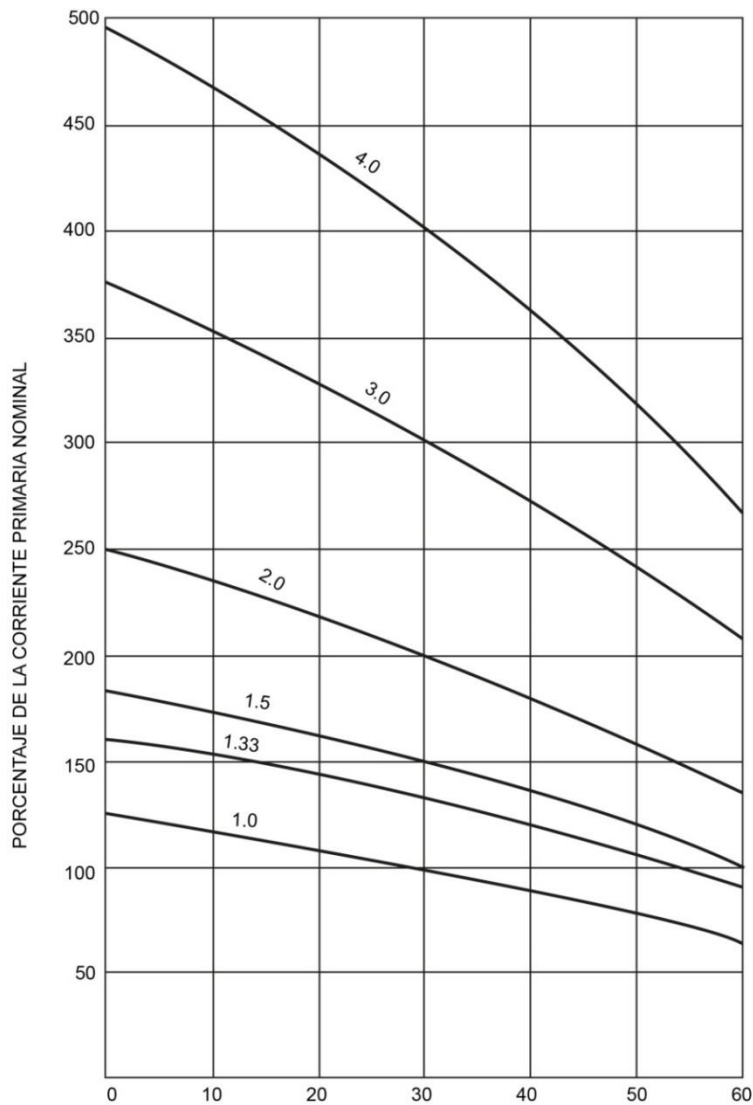
transformador de corriente para media tensión con relación de transformación de 25:5 amperios y factor de corriente térmica continua de 3,0 a una temperatura promedio 30 °C en un lapso de 24 horas, establece que a dicha temperatura el transformador de corriente tiene la capacidad de medir hasta 75 amperios en el primario llevando al devanado secundario a suministrar 15 amperios. No se debe dejar de lado el hecho que en un transformador de corriente cuyo devanado secundario se conecta a un medidor que tomará una lectura de corriente, dichos medidores normalmente son clase 20, es decir, la corriente máxima que estos medidores pueden soportar es 20 amperios, tomando en cuenta que un transformador de corriente al 100 % de su carga suministra cinco amperios en el secundario.

Por otro lado, los fabricantes proporcionan información técnica de las pruebas realizadas al transformador de corriente respecto al desempeño de la exactitud en el nivel máximo del factor de corriente térmica continua (ver anexo A).

En la figura 18 se observan seis factores de corriente térmica continua: 1.0, 1.33, 1.5, 2.0, 3.0 y 4.0; esto indica hasta qué porcentaje del valor nominal se puede sobrecargar el transformador de corriente. La curva muestra el comportamiento del transformador de corriente al incrementarse la temperatura. Se observa que a mayor temperatura menor capacidad posee el transformador de corriente a poder sobrecargarse sin perder exactitud, cabe resaltar que un transformador de corriente de un devanado en el secundario solo puede tener un factor de corriente térmica continua. Por ejemplo, un transformador de corriente cuyo factor de corriente térmica continua (RF) es 1.5 a 30 °C, a 60 °C tendrá un RF de 1.0, en otras palabras, si el transformador de corriente se encuentra operando a una temperatura ambiente promedio de 30 °C, a dicho transformador se le puede cargar a 150 % de la capacidad del transformador.

Pero si el transformador de corriente opera a una temperatura ambiente de 60 °C no se le podrá cargar más allá de su capacidad nominal.

Figura 18. **Curvas RF para transformadores de corriente**



TEMPERATURA AMBIENTE PROMEDIO POR UN PERIODO DE 24 HORAS DADAS EN GRADOS CELSIUS ENFRIADOS POR AIRE. (LA TEMPERATURA AMBIENTE MAXIMA NO DEBE EXCEDER EL PROMEDIO EN MAS DE 10 °C)
 NOTA – ESTAS CURVAS SE BASAN EN LA SUPOSICIÓN DE QUE EL AUMENTO PROMEDIO DE LA TEMPERATURA DEL DEVANADO ES PROPORCIONAL AL CUADRADO DE LA CORRIENTE

Fuente: IEEE. *Standard requirements for instrument transformers C57*. p. 13.

3.2. Pruebas de laboratorio

Se sometió a pruebas un transformador de corriente para baja tensión y otro para media tensión, con el fin de evaluar el desempeño de la exactitud de dichos transformadores en condiciones de sobrecarga y así llevar sus núcleos a saturación. Todas las pruebas se realizaron a una temperatura ambiente promedio controlada de 25 grados Celsius y a una humedad relativa de 43,8 % (ver apéndice 2).

3.2.1. Transformador para baja tensión

Los datos técnicos del transformador de corriente para medida se observan en la siguiente tabla:

Tabla IV. Datos de un transformador de corriente para baja tensión

DATOS DEL TRANSFORMADOR DE CORRIENTE	
I-pn:	600,0 A
I-sn:	5,0 A
Carga nominal:	12,5 VA / 0,9 - B0,5
Carga funcional:	12,5 VA / 0,9 - B0,5
Norma aplicada:	IEEE C57,13
Tipo de núcleo (P/M):	M
Clase:	0,15S
RF:	2,0
f:	60,0 Hz

Fuente: datos técnicos de un transformador de corriente introducidos a un patrón calibrador.

Las pruebas realizadas al transformador de corriente en mención fueron realizadas para obtener datos del error de relación y desplazamiento de ángulo en minutos al 5 %, 100% y 200 % de su capacidad nominal. Las pruebas de 100 % y 200 % corresponden a los factores de corriente térmica continua (RF)

de 1,0 y 2,0. Debe tomarse en cuenta que el factor de corriente térmica (RF) establecida por el fabricante es 2,0. Todas las pruebas fueron realizadas en los niveles de capacidad antes mencionados a tres cargas diferentes:

- B0.1: 2,5 VA a 5 amperios secundarios y factor de potencia 0,9
- B0.2: 5,0 VA a 5 amperios secundarios y factor de potencia 0,9
- B0.5 (burden nominal): 12,5 VA a 5 amperios secundarios y factor de potencia 0,9

Lo anteriormente expuesto se resume en la siguiente tabla:

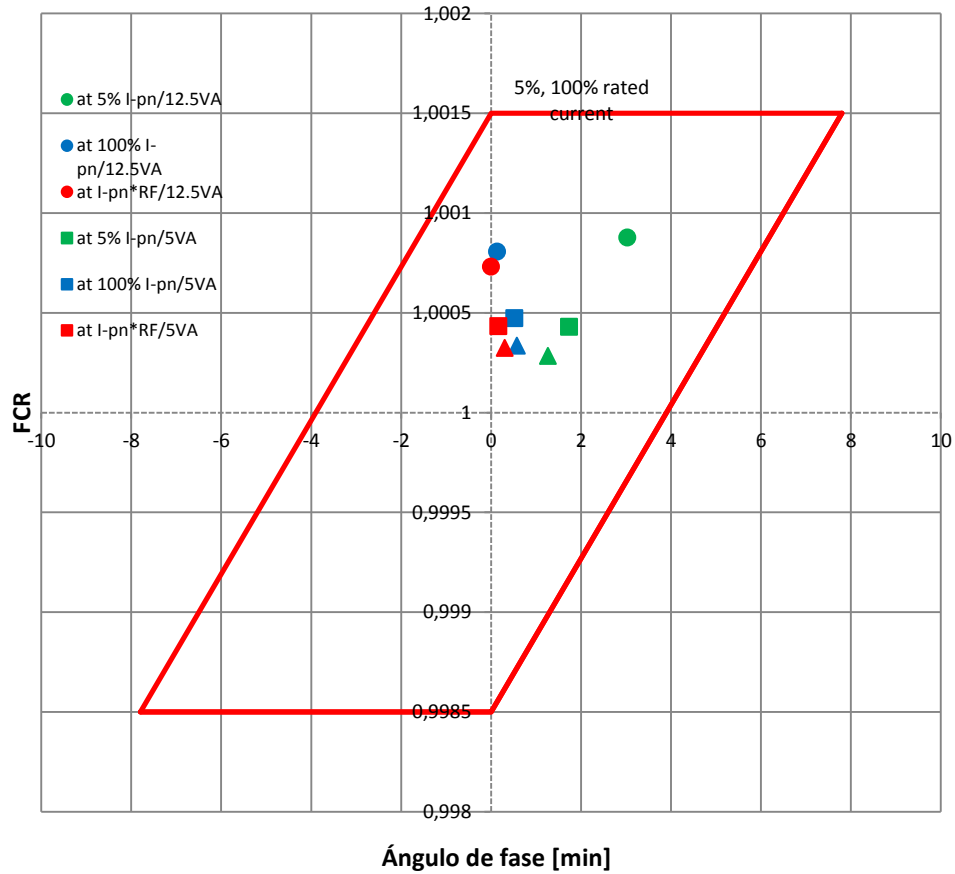
Tabla V. **Valores de FCR y desplazamiento de fase en prueba estándar**

Puntos de medida según IEEE C57.13				
Burden	% de la corriente primaria	RF a 25°C	FCR medido	Desplazamiento de fase [min]
B0,5 – 12,5 VA	200,00 %	2,0	1,0007	0,00
	100,00 %	1,0	1,0008	0,13
	5,00 %	0,05	1,0009	3,03
B0,2 – 5 VA	200,00 %	2,0	1,0004	0,17
	100,00 %	1,0	1,0005	0,52
	5,00 %	0,05	1,0004	1,74
B0,1 – 2,5 VA	200,00 %	2,0	1,0003	0,31
	100,00 %	1,0	1,0003	0,58
	5,00 %	0,05	1,0003	1,27

Fuente: resultados obtenidos de equipo calibrador de transformadores de corriente.

Los datos de factor de corrección de relación y de desplazamiento de fase anteriormente obtenidos se trazaron en el gráfico (ver figura 19) del paralelogramo (ver sección 2.4). Las conclusiones empiezan a surgir a simple vista.

Figura 19. Gráfico del paralelogramo de prueba estándar TC 600:5 - BT



Fuente: resultados obtenidos de equipo calibrador de transformadores de corriente.

Observe que el transformador de corriente para medida es aún más exacto cuando se trabaja a la menor carga (burden): 2,5 VA. Sin embargo, es importante hacer énfasis en los resultados obtenidos en las pruebas realizadas al factor de corriente térmica continua (RF), ya que a pesar de que el transformador de corriente se encuentra funcionando al 200 % de su capacidad nominal, el transformador de corriente en todos los niveles de carga conserva los límites de exactitud exigidos por la norma IEEE C57.13, con lo cual se valida que la información de placa es verídica.

Por otra parte, también se le realizaron pruebas al transformador de corriente en mención, a valores de factor de corriente térmica continua (RF) superiores a los especificadas por el fabricante en placa, en el cual el núcleo del transformador llega al punto de saturación. En este punto es donde el transformador de corriente pierde exactitud, ya que no es capaz de soportar grandes flujos magnéticos. Esto con el fin de identificar el valor del factor de corriente térmica continua (RF) donde el transformador de corriente pierde exactitud y ya no es factible utilizarlo.

Es importante recalcar que un transformador de corriente de cualquier nivel de tensión no debe ser llevado a condiciones de uso más allá que las recomendadas por las normas y fabricantes. Esto con el fin de evitar el riesgo de daño de los equipos y principalmente a las personas.

A continuación se presenta la tabla con los resultados obtenidos del factor de corrección de relación (FCR) y desplazamiento de ángulo obtenidos con los diferentes niveles de burden en el devanado secundario:

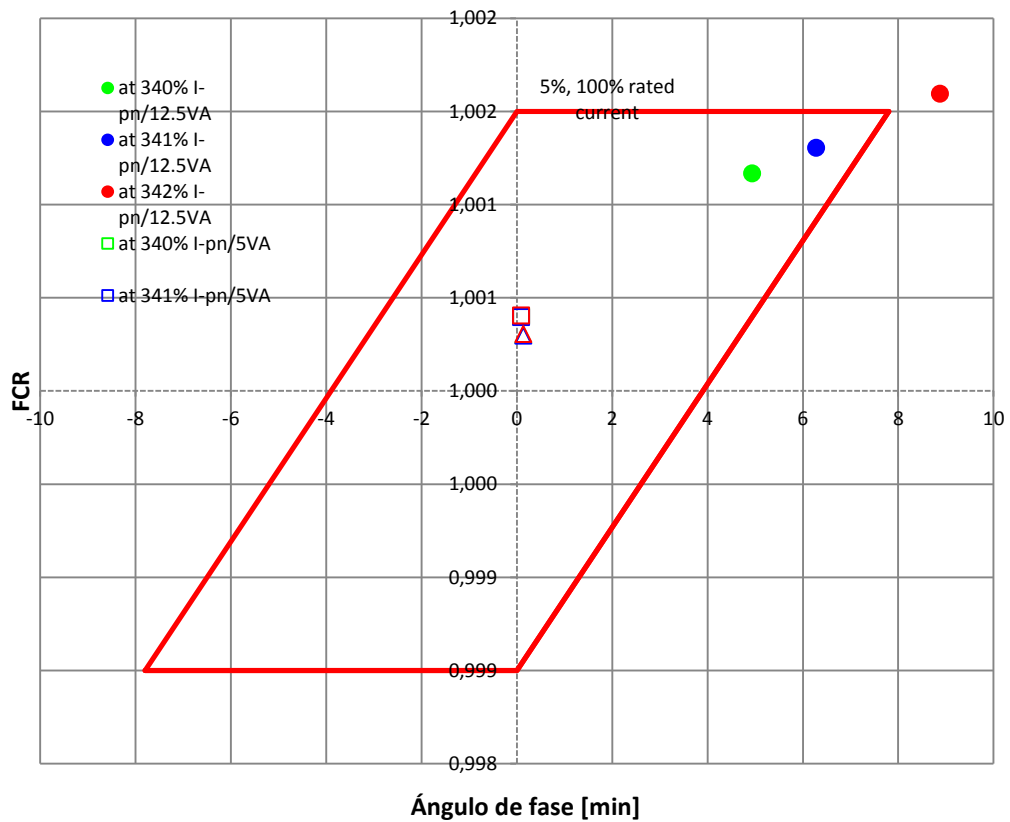
Tabla VI. Valores de FCR y desplazamiento de fase en prueba a saturación

Puntos de medida según IEEE C57.13				
Burden	% de la corriente primaria	RF a 25°C	FCR medido	Desplazamiento de fase [min]
B0,5 – 12,5 VA	342,00 %	3,42	1,0016	8,88
	341,00 %	3,41	1,0013	6,28
	340,00 %	3,40	1,0012	4,94
B0,2 – 5 VA	342,00 %	3,42	1,0004	0,09
	341,00 %	3,41	1,0004	0,09
	340,00 %	3,40	1,0004	0,09
B0,1 – 2,5 VA	342,00 %	3,42	1,0003	0,14
	341,00 %	3,41	1,0003	0,14
	340,00 %	3,40	1,0003	0,14

Fuente: resultados obtenidos de equipo calibrador de transformadores de corriente.

Los datos de factor de corrección de relación y de desplazamiento de fase obtenidos en condiciones de saturación se trazaron en el gráfico del paralelogramo tal como se muestra en la figura 20:

Figura 20. **Gráfico del paralelogramo de una prueba en condiciones de sobrecarga TC 600:5 – BT**



Fuente: resultados obtenidos de equipo calibrador de transformadores de corriente.

A pesar de que el factor de corriente térmica continua (RF), según la placa del transformador de corriente indica que es 2,0, y que se puede utilizar a una temperatura promedio ambiente de 30 °C, se llevó el transformador de corriente

a niveles más altos a los establecidos en placa, con el fin de evaluar el desempeño de la exactitud. Según la figura 20 se observa que los puntos graficados cuando el transformador trabaja a un factor de corriente térmica continua de 3,40 (prueba a 340,0 %) y 3,41 (prueba a 341,0 %) son similares, ya que la diferencia entre factores térmicos de corrientes es muy pequeña. Sin embargo, cuando se realiza la prueba al transformador de corriente al máximo burden (B0.5 – 12 VA), a un factor de corriente térmica continua de 3,42 (prueba al 342 %), el dato se sale de los límites establecidos por la norma IEEE C57.13.

Con base en la evaluación de la sobrecarga y saturación del núcleo en la prueba realizada al transformador de corriente para baja tensión, se puede establecer que los transformadores de corriente para baja tensión en ambientes con temperaturas estables inferiores a los 30 °C pueden ser llevados más allá de sus capacidades nominales. Sin embargo, se recomienda no exceder los límites establecidos por los fabricantes en las placas de los transformadores de corriente.

3.2.2. Transformador para media tensión

Las pruebas realizadas a un transformador de corriente para medida para media tensión se realizaron utilizando un ejemplar cuyas características técnicas se muestran en la siguiente tabla:

Tabla VII. **Datos de un transformador de corriente para baja tensión**

Ajustes de la prueba utilizados:	
I-pn:	25,0 A
I-sn:	5,0 A
Carga nominal:	12,5 VA / 0,9
Carga funcional:	12,5 VA / 0,9
Norma aplicada:	IEEE C57,13
Tipo de núcleo (P/M):	M
Clase:	0,15S
RF:	3,0
f:	60,0 Hz

Fuente: datos técnicos de un transformador de corriente a un patrón de calibración.

Dado que el factor de corriente térmica continua (RF) para el transformador de corriente en mención es 3,0, las pruebas realizadas y resultados obtenidos de dicho transformador son los siguientes:

Tabla VIII. **Valores de FCR y desplazamiento de fase en prueba estándar**

Puntos de medida según IEEE C57.13				
Burden	% de la corriente primaria	RF a 25°C	FCR medido	Desplazamiento de fase [min]
B0,5 – 12,5 VA	300,00 %	3,0	1,0003	0,48
	100,00 %	1,0	1,0005	0,68
	5,00 %	0,05	1,0006	4,06
B0,2 – 5 VA	300,00 %	3,0	1,0002	0,23
	100,00 %	1,0	1,0003	0,76
	5,00 %	0,05	1,0003	2,10
B0,1 – 2,5 VA	300,00 %	3,0	1,0001	0,29
	100,00 %	1,0	1,0002	0,70
	5,00 %	0,05	1,0001	1,39

Fuente: resultados obtenidos de un patrón al calibrar un transformador de corriente.

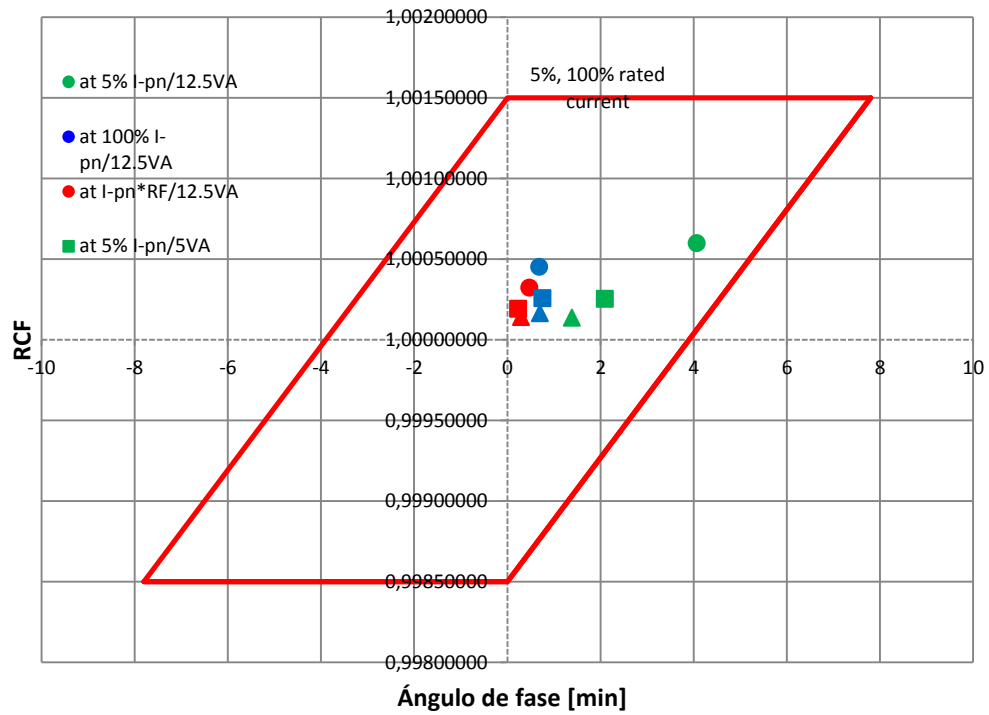
Se observa que el factor de corrección de relación (FCR) se encuentra dentro del rango establecido por el estándar IEEE C57.13 (ver tabla 3, página

18). De este modo se puede comprobar que el núcleo del transformador de corriente para medida tiene un excelente desempeño de exactitud, tanto en factor de corrección de relación como en desplazamiento de fase al mayor factor de corriente térmica continua (RF) y al menor burden. Por otra parte, tiene menor exactitud cuando el transformador de corriente se encuentra trabajando al 5 % de su capacidad nominal al máximo burden de placa B0.5 - 12.5 VA (ver figura 21).

Al graficar los resultados en un gráfico de paralelogramo se observa lo siguiente:

- Al máximo burden y 5 % de uso de la capacidad del transformador de corriente, se obtiene la menor exactitud, sin embargo, el valor se encuentra dentro de los límites normados.
- Las mejores exactitudes en un transformador de corriente se obtienen con el menor burden; desde el 5 % hasta el 300 % (RF 3,0) de la capacidad del TC.
- La mejor exactitud del transformador de corriente se obtiene con el uso del transformador de corriente a corrientes superiores a la corriente nominal y al menor burden.

Figura 21. Gráfico del paralelogramo de prueba estándar TC 25:5 – MT



Fuente: elaboración propia, empleando CT Analyzer.

También se le realizaron pruebas a dicho transformador de corriente de valores RF superiores a los establecidos por el fabricante en la placa de datos. Las pruebas se realizaron a niveles de 350 % y 400 %, que es el equivalente a niveles RF de 3,5 y 4,0. Los resultados obtenidos se presentan en la siguiente tabla:

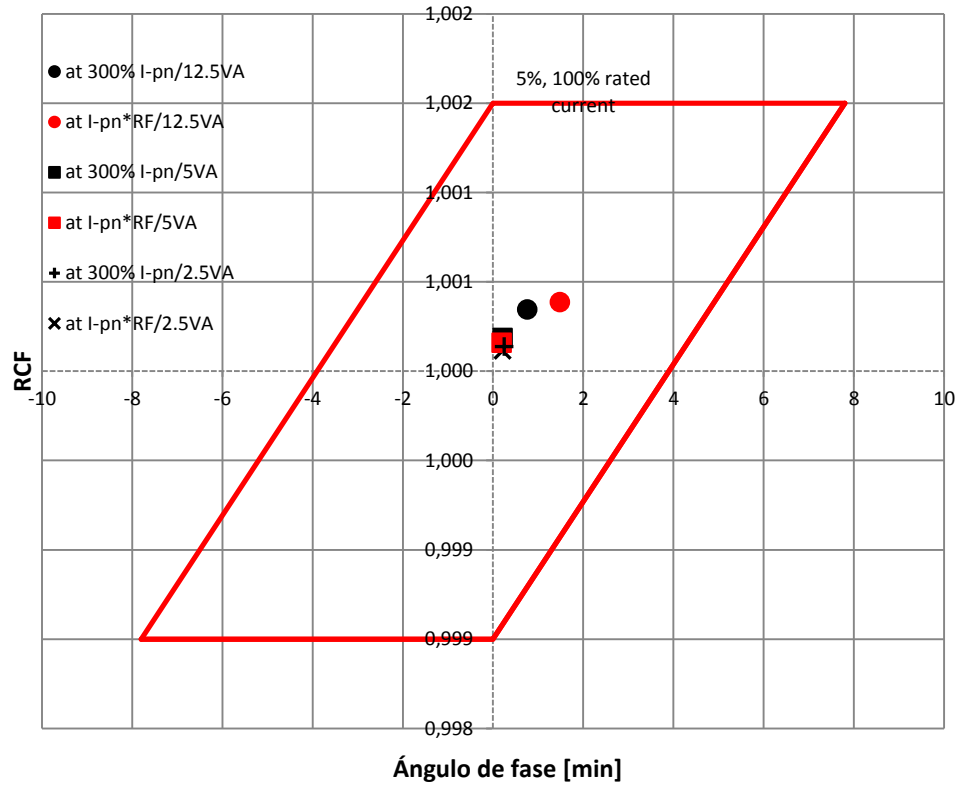
Tabla IX. **Valores de FCR y desplazamiento de fase prueba a saturación**

Puntos de medida según IEEE C57,13				
Burden	% de la corriente primaria	RF a 25°C	RCF medido	Desplazamiento de fase [min]
B0,5 – 12,5 VA	400,00%	4,0	1,0004	1,48
	350,00%	3,5	1,0003	0,76
B0,5 – 5 VA	400,00%	4,0	1,0002	0,19
	350,00%	3,5	1,0002	0,21
B0,5 – 2,5 VA	400,00%	4,0	1,0001	0,21
	350,00%	3,5	1,0001	0,25

Fuente: resultados obtenidos de un patrón al calibrar un transformador de corriente.

Para apreciar los resultados se han trazado los puntos en el gráfico del paralelogramo (ver figura 22). Se observa de primera mano que en el transformador de corriente a niveles RF superiores a los que establece el fabricante no existe ninguna forma que el transformador se sature y pierda toda exactitud. Todos los resultados arrojaron pruebas positivas. Las pruebas para este tipo de transformador de corriente se realizaron con un RF máximo de 4,0, dado que la norma IEEE C57.13 establece parámetros definidos para factores de corrientes térmicas continuas hasta 4,0 y no para factores superiores a 4,0.

Figura 22. **Gráfico del paralelogramo de una prueba en condiciones de sobrecarga TC 25:5 – MT**



Fuente: resultados obtenidos de equipo calibrador de transformadores de corriente.

Para poder hacer uso del factor de corriente térmica continua (RF), es importante tomar en cuenta la temperatura a la cual estará operando el transformador de corriente. Se debe hacer la observación de que todas las pruebas realizadas anteriormente han sido realizadas a una temperatura ambiente controlada de 25 °C promedio y humedad relativa de 43,8 % (ver apéndice 2).

3.3. Selección de un transformador de corriente

Para obtener mejores resultados en la exactitud de la medición de corriente que se desea realizar con el transformador de corriente (TC), es importante conocer cómo es el comportamiento del TC. La corriente del devanado primario (corriente que se desea medir), debe ser de magnitud determinada para obtener un flujo magnético que logre una saturación mínima en el núcleo, para poder suministrar una corriente suficiente en el devanado secundario útil y exacta para medir; por otra parte, es necesario conocer hasta donde es posible sobrecargar el TC sin perder exactitud. Es por esta razón que es muy importante el correcto dimensionamiento de un transformador de corriente. Un mal dimensionamiento de un TC permite, primero, que las medidas sean erróneas y, segundo, una selección errónea del tipo de TC requerido y, por ende, una mala inversión económica.

La correcta selección de transformadores de corriente resultará en un correcto desempeño del aparato y medidas exactas que serán útiles. Existen varios parámetros a tomar en cuenta para la selección de los transformadores de corriente dentro de los cuales se tienen los siguientes parámetros:

3.3.1. Tipo de norma de fabricación

En términos generales existen dos normas con las cuales son fabricados los transformadores de corriente. La primera norma es la ANSI-IEEE C57.13 y la segunda norma es la IEC 60044-1. La norma ANSI-IEEE C57.13 contiene las normativas americanas referentes a los transformadores de corriente y transformadores de voltaje, sin embargo, la norma IEC 60044-1 es referente exclusivamente para transformadores de corriente en normativa europea. En ambas normas se presentan las pruebas que deben realizarse a los

transformadores de corriente, para cumplir con los requerimientos de la norma con la cual fue fabricado el transformador de corriente.

3.3.2. Frecuencia de la red

Unos de los parámetros importantes para la selección de un transformador de corriente es la frecuencia de la red a la cual se conectará. En algunos países europeos se trabaja con frecuencias de 50 Hz, sin embargo, en Guatemala específicamente, tanto la red de transmisión como la de distribución, funcionan con una frecuencia de 60 Hz, de modo que en Guatemala todos los transformadores de medida deben estar diseñados para trabajar a dicha frecuencia.

3.3.3. Voltaje primario

Es de vital importancia conocer el voltaje primario al cual será sometido el transformador de corriente, ya que esto definirá el aislamiento y el costo económico del mismo. Comercialmente existen transformadores de corriente para baja tensión (Low Voltage –LV-), para niveles de tensión que van desde los cero voltios hasta los 600 voltios, lo cual cubre el rango de voltajes comerciales que suministran las distribuidoras: 120/240 voltios, 120/208 voltios y 240/480 voltios.

Figura 23. **Transformador de corriente de 200:5 para baja tensión**



Fuente: ABB. Instrument transformer reference guide.

Además se conocen transformadores de corriente para media tensión, los cuales cubren un rango de voltajes que van desde los 5 kV hasta los 36 kV, cubriendo los voltajes en la red de distribución más comunes en Guatemala, los cuales son 13.2 kV y 34.5 kV.

Figura 24. **Transformador de corriente de 200:5 para media tensión**



Fuente: ABB. Instrument transformer reference guide.

Es muy importante tomar en cuenta el voltaje primario al cual estará funcionando el TC, ya que no es lo mismo un transformador de 200:5 para baja tensión (ver figura 23) que un transformador de 200:5 para media tensión (ver figura 24), ya que el aislamiento y encapsulado variarían y, por ende, variará la forma en que estos serán instalados.

3.3.4. Corriente primaria del servicio

Conocer la corriente primaria de la carga que se desea medir es importante, ya que esta determinará la relación del transformador de corriente óptimo para el cual la medida de corriente será exacta, tomando en cuenta cualquier eventual reducción de corriente primaria. Para el cálculo de la corriente primaria que se desea medir se puede utilizar la siguiente ecuación:

$$I = \frac{S}{\sqrt{3} \cdot V}$$

Donde:

- $S =$ potencia aparente en VA
- $V =$ voltaje de servicio primario en Voltios (V)
- $I =$ corriente de servicio primaria en amperios (A)

3.3.5. Corriente primaria nominal del TC

Para evitar confusiones es importante explicar que la corriente primaria del servicio y la corriente primaria nominal del TC puede que sean corrientes diferentes o iguales, sin embargo, son dos conceptos totalmente diferentes. La corriente nominal del TC debe ser igual o mayor a la corriente del servicio y esta será un valor establecido por el fabricante que no cambiará, se debe tomar en

cuenta la figura 12 de la curva de excitación del transformador de corriente, con el fin de que las variaciones de la corriente de servicio (corriente de la carga) se encuentren en el rango de operación del transformador de corriente.

Se debe tener presente que el transformador de corriente debe ser capaz de soportar continuamente la corriente del circuito primario y para ello se debe tomar en cuenta la temperatura promedio a la cual será sometido el TC. Comúnmente los transformadores de corriente están diseñados para soportar temperaturas entre los 30 °C hasta los 55 °C según la norma ANSI-IEEE C57.13.

Se sugiere seleccionar transformadores de corriente cuya corriente primaria nominal sea entre un 20 % y 40 % de la corriente primaria del servicio, esto con el fin de obtener una mejor resolución en los equipos de medición. Una vez seleccionada la corriente primaria nominal del transformador de corriente debe seleccionarse de los catálogos de los fabricantes el valor inmediato superior comercial.

3.3.6. Valor de la corriente secundaria nominal

La norma IEEE-C57.13 estandariza cinco amperios como la corriente nominal secundaria de un transformador de corriente, por esta razón en el mercado americano suele encontrarse estos equipos con corrientes nominales secundarias de cinco amperios. Por otro lado, el estándar IEC establece tres niveles de corrientes secundarias: un amperio, dos amperios y cinco amperios; sin embargo, el valor preferido es cinco amperios.

3.3.7. Carga nominal secundaria

La carga nominal secundaria de un transformador de corriente es conocida también como el burden del transformador y este concepto es utilizado tanto para transformadores de corriente como para transformadores de voltaje. Es importante tener clara la potencia requerida por la carga o cargas a conectar al devanado secundario del TC, con el fin de seleccionar correctamente el burden del TC. Las cargas nominales secundarias para transformadores de medida se encuentran normalizadas en el estándar ANSI-IEEE C57.13 y se muestran a continuación:

Tabla X. **Burden estandarizados para transformadores de corriente para medición con devanados secundarios a 5A**

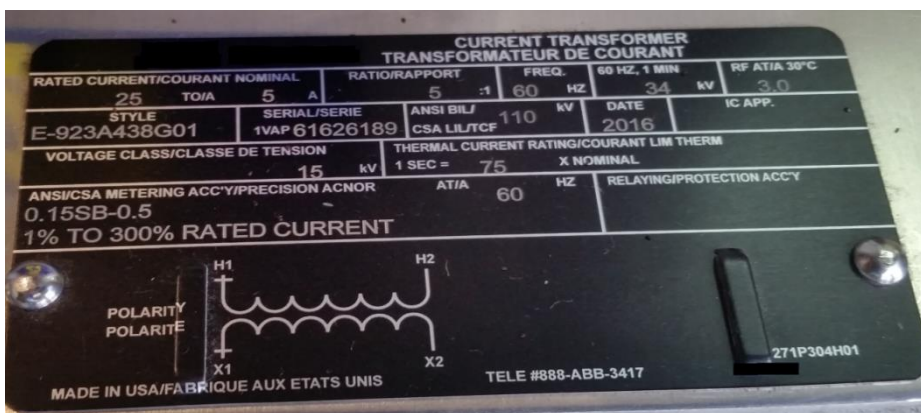
Designación del Burden	R (Ω)	L (mH)	Z (Ω)	Potencia Total (VA a 5A)	Factor de Potencia
B-0,1	0,09	0,116	0,1	2,5	0,9
B-0,2	0,18	0,232	0,2	5,0	0,9
B-0,5	0,45	0,580	0,5	12,5	0,9
B-0,9	0,81	1,040	0,9	22,5	0,9
B-1,8	1,62	2,080	1,8	45,0	0,9

Fuente: elaboración propia, con datos de las normas ANSI/IEEE C57.13

No se debe tomar a la ligera la carga secundaria en el TC, ya que puede ser perjudicial para la exactitud del transformador de corriente. Los transformadores de corriente están diseñados para cubrir un amplio rango de cargas secundarias. En la figura 25 se observa la fotografía de la placa de un transformador de corriente para media tensión. Se puede observar en la parte central izquierda, lla cual literalmente indica 0.15SB-0.5, esto quiere decir que la clase de exactitud es 0,15S y la carga o burden nominal que puede conectarse a este transformador de corriente es hasta B-0.5. Esto indica que la exactitud

mencionada en la placa se mantendrá desde un burden 0 VA (cuando las terminales secundarias del TC se encuentran cortocircuitadas) hasta el burden máximo que es a B-0,5 o un burden cuya demanda de potencia del devanado secundario sea 12,5 VA a un factor de potencia de 0,9. En la actualidad la mayoría de burden que se conectan en el devanado secundario de un transformador de corriente son cargas puramente electrónicas, estas demandan un menor consumo de potencia.

Figura 25. Placa de características de un TC



Fuente: elaboración propia.

Se debe tomar en cuenta qué tipo de carga se conectará al secundario, por ejemplo, si se conecta un medidor trifásico en el cual llegarán tres señales de corriente (una por fase) y tres señales de voltaje (una por fase), se debe tomar en cuenta la hoja de datos del medidor para identificar la carga en VA requerida por cada fase del medidor, además es útil tomar en cuenta la distancia del cableado secundario del transformador de medida hasta el medidor, ya que el conductor eléctrico también introduce carga al transformador de corriente.

4. EFECTO DE LA SATURACIÓN DEL NÚCLEO EN EL TRANSFORMADOR DE CORRIENTE

Uno de los elementos que determinan la exactitud del transformador de corriente es el núcleo, dado que este es el medio utilizado para facilitar el flujo magnético que entrelaza el devanado primario y el secundario. Los materiales utilizados para la fabricación de núcleos inciden directamente en la exactitud del transformador de corriente.

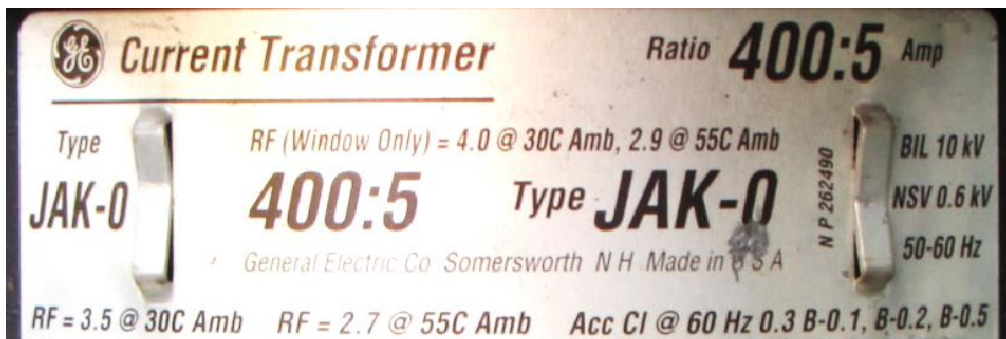
Normalmente los transformadores de corriente, tanto los de medida como los de protección, se construyen con núcleos cuyas chapas magnéticas son de gran permeabilidad. El núcleo de un transformador de medida es diferente al núcleo de un transformador de protección, ya que son utilizados para fines distintos. Un transformador de corriente destinado para protección posee un núcleo de saturación lenta, mientras que un transformador de corriente destinado para medida será de saturación rápida.

4.1. Saturación del núcleo del transformador de corriente por sobrecarga

Un transformador de corriente para medida en donde la corriente primaria es la corriente nominal no necesariamente es un indicador de que el transformador se encuentre saturado y que corrientes superiores ya no serán medidas o que el transformador tiene riesgo de daño. Esto se debe a que los transformadores de corriente para medida, tanto para baja tensión como para media tensión, son fabricados para soportar corrientes mayores a la nominal.

Por ejemplo, se tiene un equipo de medición conformado por tres transformadores de corriente para medida, cuya relación de transformación es 400:5 (ver figura 26). Esto quiere decir que la corriente nominal es 400 amperios. Dichos transformadores de corriente fueron sometidos a corrientes primarias superiores a la nominal, la medición se realizó por período de 24 horas a una temperatura aproximada de 72°C, obteniendo mediciones de corriente promedio cada 15 minutos, las cuales se muestran en la figura 27 (ver apéndice 1 para observar las mediciones obtenidas). Obsérvese que las medidas de corriente obtenidas a partir de las 7:00 am son superiores a la corriente nominal primaria, principalmente el TC de la fase B tiene una corriente de 707,2 amperios, esto quiere decir que el TC se encuentra sobrecargado en un 176 %.

Figura 26. **Placa de datos de un transformador de corriente para medida para 600 voltios – TC para baja tensión**

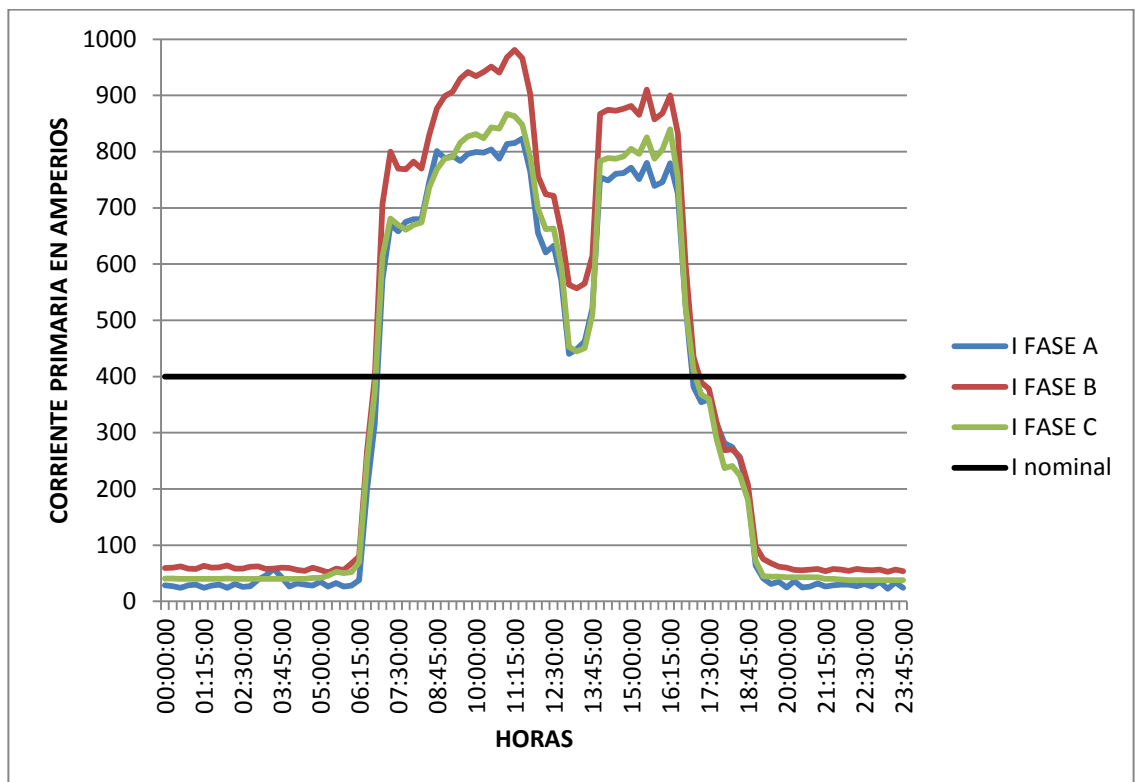


Fuente: elaboración propia.

A pesar de que el transformador de corriente está diseñado para una corriente primaria nominal de 400 amperios, en este caso en particular se le introdujo corriente primaria de 707.2 amperios. Sin embargo, la corriente máxima no es la anteriormente mencionada, la corriente máxima la alcanzó la

fase B a las 11:15 am, obteniendo una lectura promedio de corriente en 15 minutos de 980,8 amperios, lo equivalente a 2,45 veces la capacidad nominal del transformador de corriente.

Figura 27. **Curva de corrientes en 24 horas**



Fuente: elaboración propia.

4.1.1. Factor de carga

Para poder instalar un transformador de corriente con una demanda máxima mayor a la nominal que este puede soportar es importante tomar en cuenta el factor de carga. El factor de carga indica el grado en el que la demanda máxima se sostiene por un período determinado de tiempo.

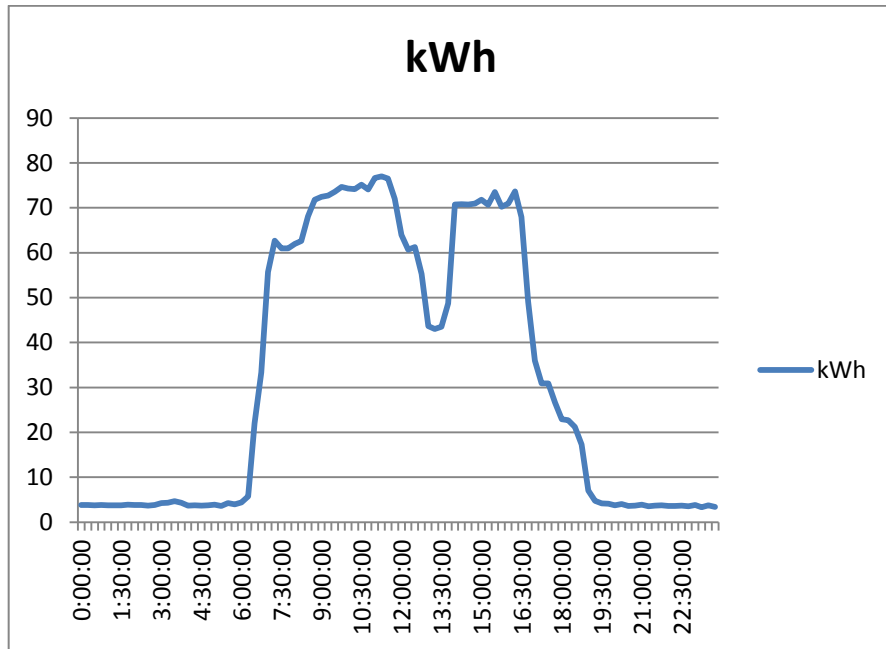
Existen cargas que son variables en el tiempo, en el caso de una industria que trabaja de 7:00 a 17:00 horas, por ejemplo, posee una disminución considerable de carga de 17:00 horas hasta las 7:00 horas del día siguiente, debido a que no se encuentran todos los procesos de producción en curso. En estos casos no aplican bombas de agua que mantienen cargas constantes por largos períodos de tiempo.

Es importante conocer el factor de carga donde se encuentran instalados los transformadores de corriente, con el fin de conocer cuánto tiempo se encuentra el transformador en condición de sobrecarga. El factor de carga se calcula de la siguiente manera:

$$\text{factor de carga} = \frac{\text{Energía de un periodo determinado de tiempo}}{\text{Demanda máxima} * \text{horas de un periodo de tiempo}}$$

Se obtuvieron mediciones de energía y demandas de potencia para el mismo caso mencionado en la sección 4.1, las cuales permitieron realizar el siguiente gráfico (ver apéndice 3 para observar las mediciones obtenidas):

Figura 28. Consumo de energía en un período de 24 horas



Fuente: elaboración propia.

Con dichos valores se puede calcular el factor de carga por un período de 24 horas, lo cual indicará aproximadamente el tiempo en que el transformador de corriente se encuentra en condición de sobrecarga.

$$factor\ de\ carga = \frac{\sum Energías}{Demanda\ Maxima * Horas\ de\ intervalo\ de\ tiempo}$$

$$factor\ de\ carga = \frac{3095.24\ kWh}{308.05\ kW * 24\ h} = 0.42$$

El resultado anterior indica que el 42 % del día el equipo de medición se encuentra en condiciones de sobrecarga. Para este caso, por ejemplo, es importante tomar la decisión de cambiar dicho equipo de medición, ya que,

aunque el 42 % del tiempo mantiene condición de sobrecarga, la temperatura ambiente a la cual se encuentra operando supera los 30 °C que establece el fabricante en placa para operar el transformador de corriente en el mayor factor de corriente térmica continua establecida por el fabricante.

4.2. Saturación provocada por agentes externos a la instalación

La saturación del núcleo del transformador de corriente puede llevarse a cabo no solamente por el exceso de carga a medir en el lado del devanado primario del transformador de corriente. Existe otro tipo de saturación del núcleo del transformador, la cual puede ser perjudicial para el aparato, dañándolo totalmente. Esta saturación puede llevarse a cabo cuando una descarga atmosférica (rayo) incide en la línea de media tensión provocando altos niveles de corriente y altos niveles de voltaje, los cuales pueden llevar al transformador de corriente a un estrés térmico y físico suficientes como para dañar al equipo.

Una descarga atmosférica (rayo) normalmente posee corrientes eléctricas entre 110 y 5 000 amperios, sin embargo, dependiendo del lugar donde se encuentre en el globo terráqueo, existen rayos que pueden llegar hasta los 20 000 amperios. La duración con la cual un rayo está en contacto con la red eléctrica donde se encuentre instalado el transformador de corriente es determinante para el equipo, ya que, de no poseer protecciones para sobrecorrientes, el transformador de corriente puede llegar a dañarse parcial o totalmente.

Para evitar que los transformadores de corriente para media tensión se dañen es importante la instalación de cortacircuitos cuyos fusibles serán los que se dañen antes que las corrientes altas lleguen a ser perjudiciales para dichos equipos (ver anexo B: curva de respuesta de los fusibles para media tensión).

Por otro lado, en el caso de los transformadores de corriente para baja tensión, es importante la instalación de interruptores termomagnéticos para la protección de los mismos durante fallas.

4.3. Razones por las que se debe reemplazar un transformador de corriente

Existen diversas razones por las cuales se deberá cambiar un transformador de corriente, algunas razones serán muy evidentes y otras requerirán del uso de equipos adicionales para determinar si es necesario realizar el reemplazo de un transformador de corriente.

4.3.1. Deterioro de aislamiento por condiciones ambientales

En el mercado eléctrico se encuentran transformadores de corriente para baja y media tensión diseñados para instalación exterior, interior y para ambas aplicaciones. Los transformadores que se instalan en interiores sufren menos, ya que normalmente se encuentran encapsulados en cajas diseñadas para protegerles, sin embargo, también pueden sufrir daños en el aislamiento debido a condiciones ambientales.

Por otra parte, los transformadores que mayormente se deterioran por condiciones ambientales son los transformadores que se instalan en el exterior, ya que están expuestos a lluvia, calor, radiación UV, vibraciones, polvo, así como a contaminación por emisiones de gases como monóxido de carbono, dióxido de carbono, hidrocarburos, etc.

En la figura 29 se observa el deterioro que sufre el aislamiento de un transformador de corriente para media tensión por excesiva contaminación de polvo.

Figura 29. **Aislamiento deteriorado de transformador de corriente para media tensión**



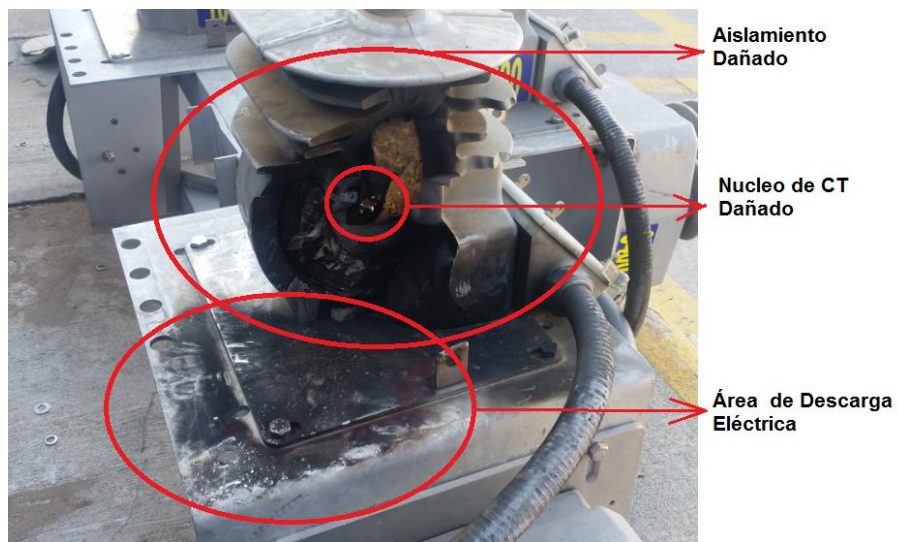
Fuente: elaboración propia.

4.3.2. Deterioro del aislamiento por fallas eléctricas

Cualquier transformador de corriente, sea para baja tensión o para media tensión, estará expuesto a sufrir daños severos originados por una descarga electroatmosférica directa o indirecta, o ya sea por una falla eléctrica en la cual la corriente de falla supere la rigidez dieléctrica del aislamiento. En ambos casos será notorio el daño ocasionado al aislamiento del transformador de corriente.

En la figura 30 se observa que el daño es evidente, ya que se logra observar material del núcleo fundido, aislamiento dañado y el área donde el arco eléctrico se neutralizó a tierra:

Figura 30. **Transformador dañado por falla eléctrica**



Fuente: elaboración propia.

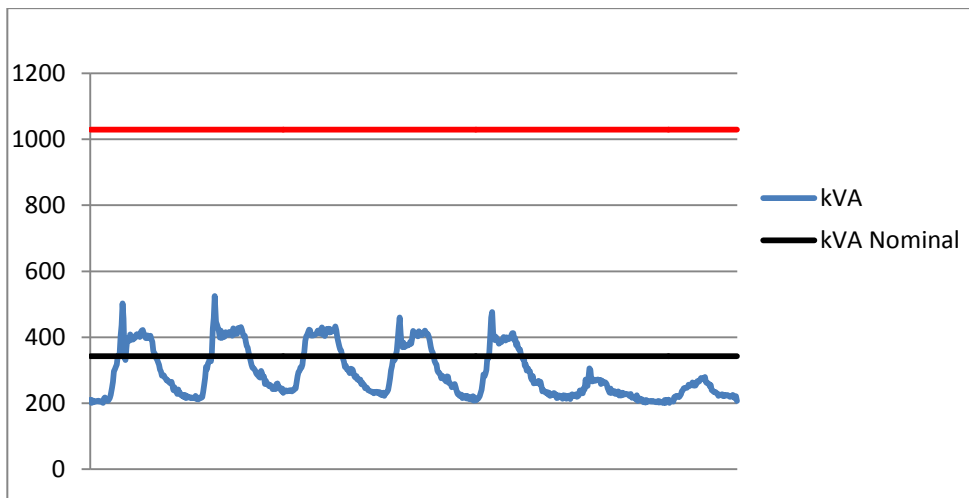
4.3.3. Equipo sobrecargado

Aunque los transformadores de corriente para media y baja tensión poseen un factor de corriente térmica continua, existen límites impuestos por los materiales con los que se fabrican los transformadores de corriente, los cuales no se pueden sobrepasar para evitar cortes de energía eléctrica abruptos sin previo aviso.

En la figura 31 se observa el límite nominal del equipo de medición (línea negra), y también se observa el límite máximo de potencia que puede medir

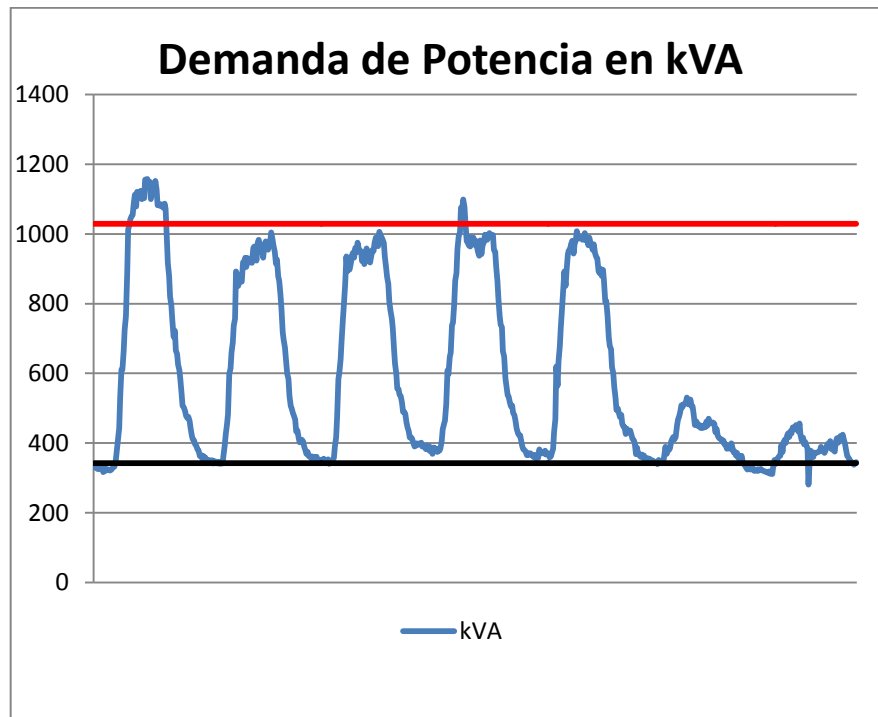
dicho equipo (línea roja), tomando como límite máximo el factor de corriente térmica continua. A pesar de que las demandas de potencia que logran medir los transformadores de corriente son superiores a la potencia nominal que estos pueden medir, los equipos se desarrollan en su máximo potencial, ya que se usan los transformadores de corriente en el factor de corriente térmica continua, por lo que los equipos medirán correctamente dicha demanda de potencia.

Figura 31. **Demanda de potencia en kVA por lapso de siete días**



Fuente: elaboración propia.

Figura 32. **Gráfico de demanda de potencia por lapso de siete días**



Fuente: elaboración propia.

Los transformadores de corriente pueden usarse para medir corrientes superiores a las nominales siempre y cuando la corriente a medir no supere el factor de corriente térmica continua a la temperatura ambiente que el fabricante establezca. Las mediciones obtenidas en el gráfico 31 se encuentran entre el rango nominal de medición de corriente y el límite máximo establecido por el factor de corriente térmica continua, por lo que los transformadores de corriente se encuentran en el rango de operación óptima. No obstante, en el gráfico 32 se observa que las demandas de potencia a medir superan el factor de corriente térmica continua, es en este punto donde el transformador de corriente corre riesgo de dañarse o tomar medidas fuera de la exactitud establecida por el fabricante en la placa.

5. MÉTODOS PARA EVITAR LA SATURACIÓN DEL NÚCLEO EN TRANSFORMADORES DE CORRIENTE

Es de vital importancia evitar la saturación del núcleo en los transformadores de corriente, ya que la finalidad de estos equipos es medir diferentes niveles de corriente con exactitud, lo que se traduce en costos económicos cuando se trata de medición para venta o compra de energía eléctrica. Existen formas de determinar el estado en el cual se encuentran operando los transformadores de corriente para evitar la saturación del núcleo de dichos equipos.

5.1. Verificaciones periódicas

Realizar verificaciones periódicas a los equipos ayuda a determinar las condiciones físicas en las cuales se encuentran operando, ya que los transformadores pudiesen estar operando en condiciones extremas que pueden poner en riesgo la correcta medición de corriente eléctrica. Las verificaciones periódicas pueden ayudar a:

- Establecer la condición física del alambrado secundario del equipo.
- Establecer la condición física del aislamiento de los transformadores de corriente.
- Tomar medidas primarias para establecer que los transformadores de corriente no se encuentren sobrecargados.
- Establecer períodos óptimos de mantenimiento.

En ocasiones una simple inspección visual puede ayudar a establecer la condición de operación de los transformadores de corriente y anticiparse a fallas en el sistema eléctrico. En la figura 33 se observa un transformador de corriente con daño en el aislamiento, sin embargo, esto no afecta la exactitud de la medida en lo absoluto, sin embargo, a futuro puede significar fallas en las instalaciones eléctricas.

Figura 33. **Transformador de corriente en operación con daños en el aislamiento**



Fuente: elaboración propia.

5.2. Instalación de equipos de medida con perfiles de carga

La instalación de equipos de medida con perfiles de carga es de mucha utilidad, ya que esto brinda un panorama amplio de lo que está midiendo el transformador de corriente. Puede ser posible que las medidas que se puedan

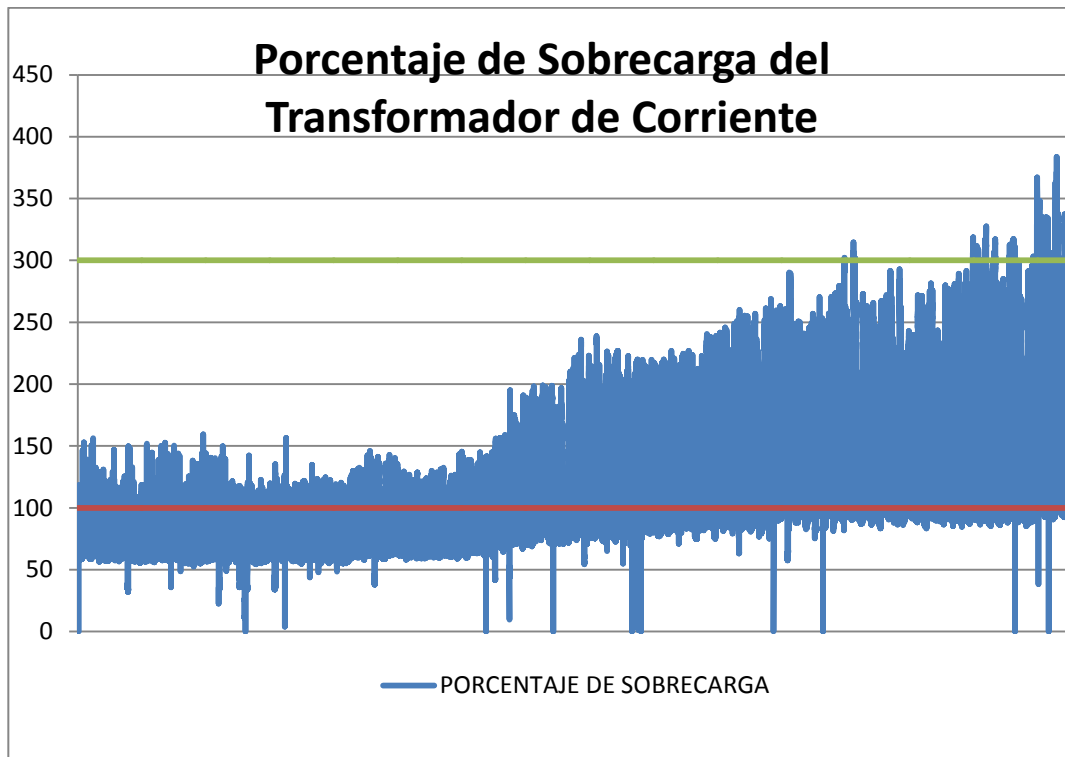
tomar en una verificación periódica no reflejen sobrecarga de los transformadores de corriente, sin embargo, con la instalación de un equipo con perfiles de carga se podrá observar si los transformadores de corriente se encuentran sobrecargados y en qué período de tiempo se mantienen sobrecargados.

En la figura 34 se muestra el comportamiento de la carga en un período determinado de tiempo, en el cual se observa que el transformador de corriente se encuentra operando en instantes de tiempo abajo de la capacidad nominal y en períodos de tiempo se encuentra operando en el factor corriente térmica continua, sin embargo, esto no afecta en absoluto la exactitud de la medición de corriente, ya que los fabricantes garantizan la exactitud de la medida en este rango de operación.

Por otra parte, se observa que justo el 75 % del tiempo que estuvo el medidor con perfil de carga, los transformadores de corriente se sobrecargan superando el factor de corriente térmica continua poniendo en riesgo las instalaciones eléctricas. Esto es útil para la toma de decisiones con respecto al cambio de los equipos por unos de mayor capacidad, dependiendo de la proyección de demanda de potencia que posea la industria, o proyección de generación de energía que posea la planta generadora.

Se debe tomar en cuenta que los transformadores de corriente para baja y media tensión son robustos, de forma que aún soportan las condiciones de operación en sobrecarga más allá del factor de corriente térmica continua, sin embargo, no se debe tomar a la ligera la decisión de realizar el cambio de dichos equipos, ya que se puede poner en riesgo la integridad de las personas y de los equipos.

Figura 34. Perfil de demanda de potencia en kVA



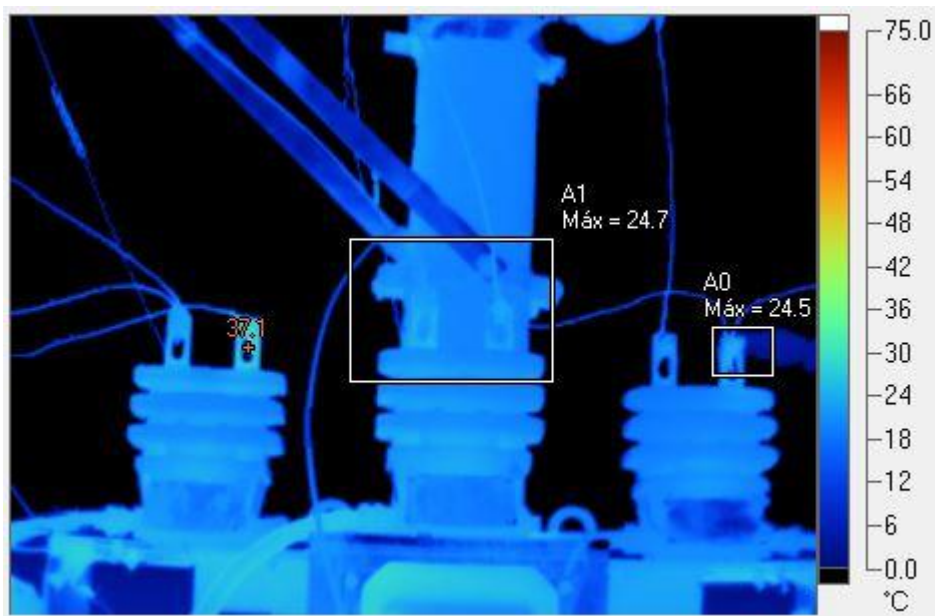
Fuente: elaboración propia.

5.3. Estudios termográficos

Otra forma de determinar la saturación del núcleo en los transformadores de corriente para baja y media tensión es el uso de cámaras termográficas, ya que la saturación del núcleo de un transformador siempre ocasionará el incremento en la temperatura del equipo. Nunca se deberá palpar o tocar un transformador de corriente sobrecargado para evaluar su temperatura, ya que esto puede provocar quemaduras o electrocución, es por esto que se utilizan cámaras termográficas.

En la figura 35 se observa una fotografía termográfica de tres transformadores de corriente para media tensión operando a 168 % de su capacidad nominal, es decir, se encuentran operando en su factor de corriente térmica continua, por lo que los equipos, a pesar de estar por arriba de su capacidad nominal, aún no han llegado a la saturación del núcleo, pero debido a que la corriente primaria es alta empiezan a surgir puntos con calentamiento fuera de los patrones habituales en las conexiones más débiles de la instalación. Es por esto que es importante realizar estudios termográficos periódicos a dichos equipos.

Figura 35. **Fotografía termográfica de transformadores de corriente operando al 168 % de su capacidad**

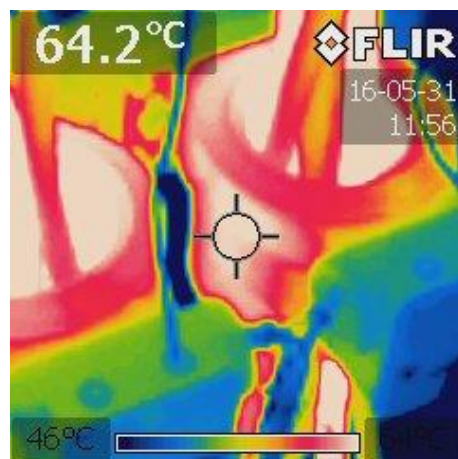


Fuente: elaboración propia.

En la figura 36 se observa la fotografía termográfica de un transformador de corriente para baja tensión tipo ventana, en la cual es evidente la alta

temperatura a la cual se encuentra operando. En la figura 18 se encuentra la gráfica establecida en la norma IEEE 57.13 acerca del cambio del factor de corriente térmica continua con respecto a la temperatura, en la cual se tiene registrado hasta un aumento de 60 °C, sin embargo, el transformador de corriente de la figura 36 está operando a una temperatura superior a la cual establece la normativa.

Figura 36. **Fotografía termográfica de un transformador de corriente para baja tensión tipo ventana**



Fuente: elaboración propia.

CONCLUSIONES

1. Los transformadores de corriente para medida según el tipo, marca y requerimientos del usuario, pueden ser utilizados sobre su capacidad nominal sin perder exactitud según el límite establecido por el factor de corriente térmica continua que se indique en la placa de datos.
2. El factor de corriente térmica continua es un valor numérico que establece cuánto más se puede sobrecargar el transformador de corriente sin dañarse y sin perder exactitud.
3. El factor de corriente térmica continua depende de la temperatura ambiente promedio a la cual está sometido el transformador de corriente.
4. Los transformadores de corriente de rango normal alcanzan su exactitud de placa hasta alcanzar el 100 % de su capacidad de operación.
5. Los transformadores de corriente de rango extendido con exactitud superior alcanzan su exactitud de placa desde el 5 % de su capacidad nominal.
6. A medida que el núcleo soporte mayor flujo magnético y se acerque al punto de saturación máxima, será el punto donde el transformador de corriente es más exacto antes de perder toda exactitud.

RECOMENDACIONES

1. Para la adquisición de transformadores de corriente es necesario conocer la normativa internacional vigente con la cual serán fabricados.
2. Proteger los transformadores de medida contra sobrevoltajes y sobrecorrientes, ya que son perjudiciales para los equipos.
3. Realizar inspecciones periódicas para evaluar el estado físico de los equipos.
4. Para prolongar la vida útil del transformador de corriente se sugiere realizarle pruebas termográficas, con el fin de detectar puntos calientes en conexiones que pueden generar fallas en los equipos.
5. Limpiar periódicamente el aislamiento de los transformadores para evitar descargas eléctricas superficiales.
6. Un transformador de corriente de cualquier nivel de tensión no debe ser llevado a condiciones de uso más allá que las recomendadas por las normas y fabricantes.

BIBLIOGRAFÍA

1. ABB AB. *Instruments transformers application guide*. 3a ed. Suiza: ABB, 2009. 127 p.
2. ABB Inc. *Instrument transformers technical information and application guide*. Estados Unidos: ABB, 2004. 40 p.
3. FRAILE MORA, Jesús. *Máquinas eléctricas*. 5a ed. España: McGraw-Hill, 2003. 757 p.
4. General Electric. *Instrument transformer basic technical information and application*. Estados Unidos: General Electric.
5. HARLEY GILLELAND et al. *Handbook for electricity metering*. 10a ed. Estados Unidos: Edison Electric Institute, 2002. 584 p.
6. HARPER, Enríquez. *Protección de instalaciones eléctricas industriales y comerciales*. 2ª ed. México: Editorial Limusa, S.A. de C.V., 2003. 518 p.
7. RAS OLIVA, Enrique. *Transformadores de potencia, de medida y de protección*. 7a ed. Barcelona: Alfaomega Grupo Editor, S.A de C.V., 1995. 283 p.

8. CHRISTOPHER W. TEN HAAGEN et al. *Standard requirement for high Accuracy Instrument transformers: ANSI/IEEE C57.13.6 2005*. Nueva York: IEEE, 2005. 6 p.

9. THOMAS NELSON et al. *Standards requirements for instrument transformers: ANSI/IEEE C57.13.6 2008*. Nueva York: IEEE, 2008. 82 p.

APÉNDICES

Apéndice 1. **Resultados obtenidos de la medición de tres transformadores de corriente siendo utilizados a corrientes superiores a la nominal y funcionando en el factor de corriente térmica continua**

HORA	I FASE A	I FASE B	I FASE C
00:00:00	28,8	59,2	40,8
00:15:00	27,2	60	40,8
00:30:00	24	62,4	40
00:45:00	28,8	58,4	40
01:00:00	29,6	57,6	40
01:15:00	24	63,2	40
01:30:00	28	60	40
01:45:00	29,6	60,8	40
02:00:00	24	64	40,8
02:15:00	31,2	58,4	40
02:30:00	25,6	58,4	40
02:45:00	27,2	61,6	40
03:00:00	39,2	62,4	40
03:15:00	46,4	57,6	40
03:30:00	57,6	58,4	40
03:45:00	43,2	60	40
04:00:00	26,4	59,2	40
04:15:00	32	56	40
04:30:00	29,6	54,4	40
04:45:00	28	60	41,6
05:00:00	35,2	56	41,6
05:15:00	26,4	51,2	45,6

Continuación del apéndice 1

05:30:00	32,8	58,4	52,8
05:45:00	26,4	56	50,4
06:00:00	28	67,2	52
06:15:00	37,6	80	69,6
06:30:00	199,2	269,6	252
06:45:00	316,8	398,4	373,6
07:00:00	572,8	707,2	613,6
07:15:00	670,4	800	680,8
07:30:00	658,4	769,6	669,6
07:45:00	675,2	768,8	660,8
08:00:00	680	782,4	669,6
08:15:00	680	769,6	674,4
08:30:00	745,6	829,6	736
08:45:00	800,8	876,8	768,8
09:00:00	788	899,2	788
09:15:00	792,8	906,4	790,4
09:30:00	783,2	929,6	816
09:45:00	796	941,6	827,2
10:00:00	799,2	934,4	831,2
10:15:00	798,4	941,6	824
10:30:00	804	951,2	843,2
10:45:00	787,2	940,8	840,8
11:00:00	813,6	968	867,2
11:15:00	815,2	980,8	863,2
11:30:00	823,2	966,4	848
11:45:00	764	901,6	789,6
12:00:00	655,2	756,8	698,4
12:15:00	620,8	724	662,4
12:30:00	632,8	721,6	663,2
12:45:00	570,4	656	596
13:00:00	440	563,2	452,8
13:15:00	448,8	556,8	444,8
13:30:00	462,4	565,6	450,4
13:45:00	521,6	615,2	510,4
14:00:00	754,4	867,2	783,2
14:15:00	748,8	874,4	788,8
14:30:00	760,8	872,8	787,2

Continuación del apéndice 1.

14:45:00	761.6	876	791.2
15:00:00	771.2	881.6	804.8
15:15:00	751.2	865.6	796
15:30:00	780	910.4	825.6
15:45:00	739.2	857.6	787.2
16:00:00	745.6	868	804
16:15:00	779.2	900	840
16:30:00	725.6	832.8	753.6
16:45:00	527.2	600.8	524.8
17:00:00	381.6	435.2	411.2
17:15:00	354.4	389.6	368
17:30:00	359.2	378.4	360
17:45:00	316	319.2	288.8
18:00:00	281.6	268.8	236.8
18:15:00	274.4	270.4	240.8
18:30:00	252.8	256.8	224
18:45:00	195.2	208	180.8
19:00:00	64	98.4	72.8
19:15:00	40.8	75.2	44.8
19:30:00	31.2	68	44
19:45:00	35.2	61.6	44
20:00:00	24.8	60	43.2
20:15:00	36	56	43.2
20:30:00	24.8	55.2	43.2
20:45:00	26.4	56.8	43.2
21:00:00	32	57.6	43.2
21:15:00	26.4	53.6	40
21:30:00	28.8	57.6	40
21:45:00	29.6	56.8	39.2
22:00:00	29.6	54.4	37.6
22:15:00	27.2	57.6	37.6
22:30:00	31.2	56	37.6
22:45:00	26.4	55.2	37.6
23:00:00	35.2	56.8	37.6
23:15:00	22.4	52.8	37.6
23:30:00	33.6	56.8	37.6
23:45:00	24	53.6	37.6

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 2. **Resultados obtenidos de la medición de energía de tres transformadores de corriente siendo utilizados a corrientes superiores a la nominal y funcionando en el factor de corriente térmica continua.**

HORA	kWh	kW
0:00:00	3.8288	15.3152
0:15:00	3.7896	15.1584
0:30:00	3.7296	14.9184
0:45:00	3.7928	15.1712
1:00:00	3.7816	15.1264
1:15:00	3.732	14.928
1:30:00	3.7632	15.0528
1:45:00	3.8712	15.4848
2:00:00	3.8208	15.2832
2:15:00	3.8512	15.4048
2:30:00	3.672	14.688
2:45:00	3.808	15.232
3:00:00	4.232	16.928
3:15:00	4.328	17.312
3:30:00	4.6944	18.7776
3:45:00	4.2856	17.1424
4:00:00	3.7	14.8
4:15:00	3.7736	15.0944
4:30:00	3.6536	14.6144
4:45:00	3.7632	15.0528
5:00:00	3.8592	15.4368
5:15:00	3.5864	14.3456
5:30:00	4.2608	17.0432
5:45:00	3.9568	15.8272
6:00:00	4.368	17.472
6:15:00	5.7248	22.8992
6:30:00	22.0216	88.0864
6:45:00	33.3216	133.2864
7:00:00	55.6656	222.6624
7:15:00	62.652	250.608

Continuación del apéndice 2.

7:30:00	60.964	243.856
7:45:00	60.9592	243.8368
8:00:00	61.9584	247.8336
8:15:00	62.58	250.32
8:30:00	68.1192	272.4768
8:45:00	71.7744	287.0976
9:00:00	72.4776	289.9104
9:15:00	72.6992	290.7968
9:30:00	73.5536	294.2144
9:45:00	74.6512	298.6048
10:00:00	74.264	297.056
10:15:00	74.1264	296.5056
10:30:00	75.1536	300.6144
10:45:00	74.0544	296.2176
11:00:00	76.6408	306.5632
11:15:00	77.012	308.048
11:30:00	76.4928	305.9712
11:45:00	72.0112	288.0448
12:00:00	63.9816	255.9264
12:15:00	60.6888	242.7552
12:30:00	61.2544	245.0176
12:45:00	55.3016	221.2064
13:00:00	43.6576	174.6304
13:15:00	42.9848	171.9392
13:30:00	43.5448	174.1792
13:45:00	48.7096	194.8384
14:00:00	70.7496	282.9984
14:15:00	70.7872	283.1488
14:30:00	70.736	282.944
14:45:00	70.924	283.696
15:00:00	71.7784	287.1136
15:15:00	70.6368	282.5472
15:30:00	73.5032	294.0128
15:45:00	70.2224	280.8896
16:00:00	70.9424	283.7696
16:15:00	73.6672	294.6688
16:30:00	67.9632	271.8528

Continuación del apéndice 2.

16:45:00	49.056	196.224
17:00:00	35.9616	143.8464
17:15:00	30.8768	123.5072
17:30:00	30.8696	123.4784
17:45:00	26.6552	106.6208
18:00:00	22.9096	91.6384
18:15:00	22.7352	90.9408
18:30:00	21.24	84.96
18:45:00	17.3136	69.2544
19:00:00	7.0056	28.0224
19:15:00	4.7312	18.9248
19:30:00	4.1984	16.7936
19:45:00	4.1112	16.4448
20:00:00	3.7464	14.9856
20:15:00	4.0016	16.0064
20:30:00	3.6392	14.5568
20:45:00	3.7128	14.8512
21:00:00	3.8808	15.5232
21:15:00	3.5192	14.0768
21:30:00	3.7024	14.8096
21:45:00	3.7336	14.9344
22:00:00	3.6176	14.4704
22:15:00	3.6224	14.4896
22:30:00	3.692	14.768
22:45:00	3.5288	14.1152
23:00:00	3.8376	15.3504
23:15:00	3.3288	13.3152
23:30:00	3.7744	15.0976
23:45:00	3.4272	13.7088

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 3. **Todas las pruebas de la sección 3,2 fueron realizadas en un ambiente controlado, por tal razón se tomaron lecturas de temperatura y de humedad relativa periódicamente. Los resultados obtenidos fueron los siguientes**

HORA	RH - %	TEMP - °C
13:52:00	45.8	24.6
14:15:56	43.8	24.7
14:29:23	44.4	25.1
14:30:09	43.3	25.1
14:30:11	43.3	25.1
14:41:01	43.3	25.1
14:41:05	44.7	25.0
15:01:49	41.9	25.0
PROMEDIO	43.8	25.0

Fuente: elaboración propia.

ANEXOS

Anexo 1. **Se muestra la información técnica de las pruebas realizadas por un fabricante al transformador de corriente, presentado en el ejemplo en mención. Normalmente los fabricantes le realizan las siguientes pruebas de exactitud a los transformadores de corriente**

CURRENT TRANSFORMER

Type **KON-11HA**

Ratio **25:5**

X1-X2				X1-X2			
PRIMARY CURRENT	BURDEN	RATIO CORRECTION FACTOR	PHASE ANGLE MINUTES	PRIMARY CURRENT	BURDEN	RATIO CORRECTION FACTOR	PHASE ANGLE MINUTES
75	B-0.5	1.00047	+1.35	6.25	B-0.5	1.00063	+4.75
25	B-0.5	1.00052	+0.81	0.25	B-0.5	1.00063	+1.96

This transformer has successfully passed applicable insulation and accuracy tests specified for the design by industry standards and customer specifications. The ratio and phase angle data listed above was taken to verify the transformer's accuracy, and is a true record of tests performed on this unit at Pinetops Plant of the ABB Inc.

Signed Automatic Tester Date 12.08.2017

Obsérvese que las pruebas son realizadas al 1,0 %, 25 %, 100 % y 300 % de la capacidad nominal del transformador de corriente. Hay que tomar en cuenta que en una prueba de laboratorio el fabricante garantiza la exactitud de placa aun cuando este ha llegado a 300 % de su capacidad nominal. Por otra parte, obsérvese que las pruebas realizadas al transformador de corriente son realizadas en el máximo burden del transformador.

Continuación del anexo 1.

Las pruebas también son realizadas al menor burden, esto con el fin de garantizar la exactitud al 1,0 %, 25 %, 100 % y 300 % de la capacidad nominal del transformador de corriente. A continuación se presentan las pruebas al menor burden:

CURRENT TRANSFORMER

Type **KON-11HA**

Ratio **25:5**

X1-X2

X1-X2

PRIMARY CURRENT	BURDEN	RATIO CORRECTION FACTOR	PHASE ANGLE MINUTES	PRIMARY CURRENT	BURDEN	RATIO CORRECTION FACTOR	PHASE ANGLE MINUTES
75	B-0.1	1.00021	+0.56	6.25	B-0.1	1.00016	+0.59
25	B-0.1	1.00022	+0.86	0.25	B-0.1	1.00014	-0.37

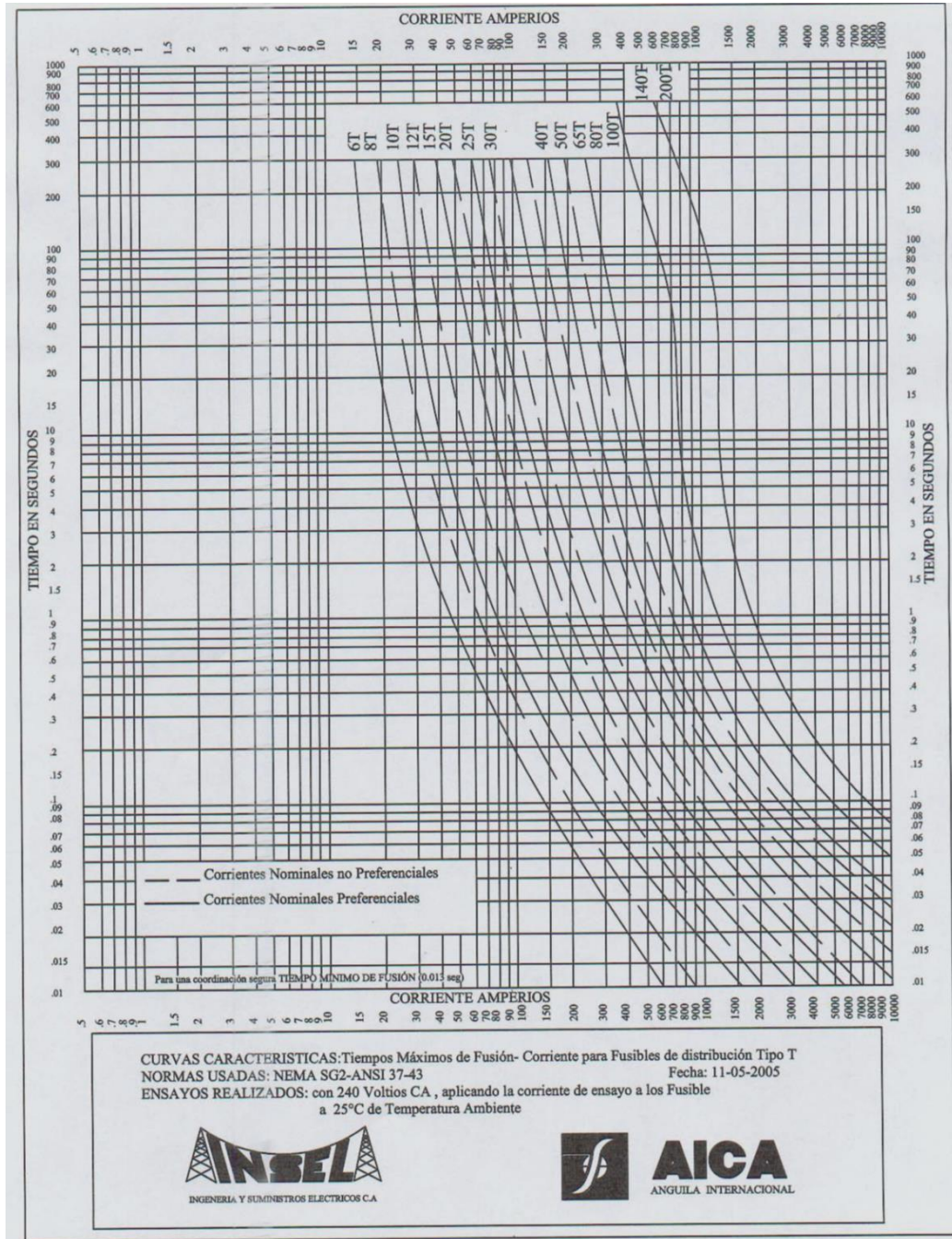
This transformer has successfully passed applicable insulation and accuracy tests specified for the design by industry standards and customer specifications. The ratio and phase angle data listed above was taken to verify the transformer's accuracy, and is a true record of tests performed on this unit at Pinetops Plant of the ABB Inc.

Signed Automatic Tester Date 12.08.2017

Fuente: Inselca. <http://www.inselca.com/admini/file/curvas%20de%20fusibles.pdf>

Consulta: 21 de abril de 2018

Anexo 2. Curvas características



Fuente: Inselca. <http://www.inselca.com/admini/file/curvas%20de%20fusibles.pdf>

Consulta: 21 de abril de 2018.

