



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

**TRANSFORMADOR DE INSTRUMENTO DE RANGO EXTENDIDO COMO ALTERNATIVA
EN LA MEDICIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA EN LA RED DE MEDIA TENSIÓN**

Edwin Renato Orellana Avila

Asesorado por el Ing. Juan Pablo Yoc de la Cruz

Guatemala, octubre de 2012

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**TRANSFORMADOR DE INSTRUMENTO DE RANGO EXTENDIDO COMO ALTERNATIVA EN
LA MEDICIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA EN LA RED DE MEDIA TENSIÓN**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

EDWIN RENATO ORELLANA AVILA
ASESORADO POR EL ING. JUAN PABLO YOC DE LA CRUZ

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO ELECTRICISTA

GUATEMALA, OCTUBRE DE 2012

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
VOCAL I	Ing. Alfredo Enrique Beber Aceituno
VOCAL II	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL III	Inga. Elvia Miriam Ruballos Samayoa
VOCAL IV	Br. Juan Carlos Molina Jiménez
VOCAL V	Br. Mario Maldonado Muralles
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

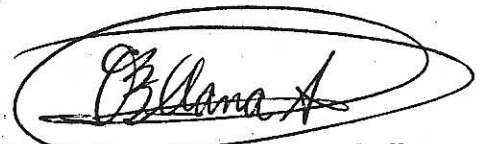
DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
EXAMINADOR	Ing. Jorge Luis Pérez Rivera
EXAMINADOR	Ing. Romeo Neftalí Lopez Orozco
EXAMINADOR	Ing. Fernando Alfredo Moscoso Lira
SECRETARIA	Inga. Marcia Ivonne Veliz Vargas

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:

TRANSFORMADOR DE INSTRUMENTO DE RANGO EXTENDIDO COMO ALTERNATIVA EN LA MEDICIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA EN LA RED DE MEDIA TENSIÓN

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, con fecha noviembre de 2010.

A handwritten signature in black ink, enclosed within a hand-drawn oval. The signature appears to read 'Edwin Renato Orellana Avila'.

Edwin Renato Orellana Avila

Guatemala, 16 de septiembre de 2011

Ing. Jorge Pérez
Coordinador de Área de Potencia
Ingeniería Mecánica Eléctrica
Facultad de Ingeniería
Universidad de San Carlos de Guatemala

Ingeniero Gómez:

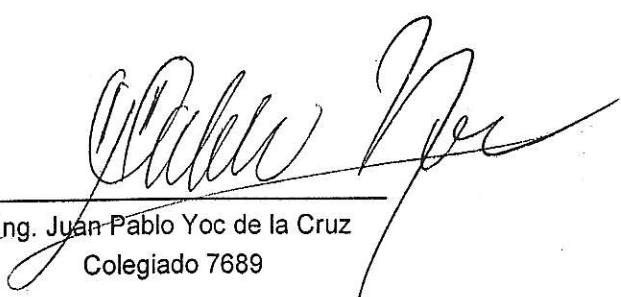
Reciba usted un cordial saludo. Me dirijo a usted para informarle que ha sido concluido el trabajo de graduación titulado **"TRANSFORMADOR DE INSTRUMENTO DE RANGO EXTENDIDO COMO ALTERNATIVA EN LA MEDICIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA EN LA RED DE MEDIA TENSIÓN"**, elaborado por el estudiante Edwin Renato Orellana Avila, carné 96-15555, tema para el cual estoy asignado como asesor.

Recomiendo se apruebe el mismo, en el entendido de que el autor y el suscrito son los responsables de lo tratado y de las conclusiones del mismo.

Le deseo éxito en sus labores

Atentamente,

F.


Ing. Juan Pablo Yoc de la Cruz
Colegiado 7689

*Juan Pablo Yoc de la Cruz
Ingeniero Mecánico Electricista
Colegiado 7689*



Ref. EIME 91.2011.

Guatemala, 23 de NOVIEMBRE 2012.

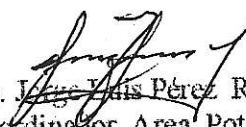
Señor Director
Ing. Guillermo Antonio Puente Romero
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica
Facultad de Ingeniería, USAC.

Señor Director:

Me permito dar aprobación al trabajo de Graduación titulado:
**"TRANSFORMADOR DE INSTRUMENTO DE RANGO
EXTENDIDO COMO ALTERNATIVA EN LA MEDICIÓN DE
ENERGÍA ELÉCTRICA EN LA RED DE MEDIA TENSIÓN",**
del estudiante **Edwin Renato Orellana Avila,** que cumple con los
requisitos establecidos para tal fin.

Sin otro particular, aprovecho la oportunidad para saludarle.

Atentamente,
D Y ENSEÑADA A TODOS


Ing. Jorge Luis Pérez Rivera
Coordinador Área Potencia

JLPR/sto





REF. EIME 01.2012.

El Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, después de conocer el dictamen del Asesor, con el Visto Bueno del Coordinador de Área, al trabajo de Graduación del estudiante; **EDWIN RENATO ORELLANA AVILA** titulado: **"TRANSFORMADOR DE INSTRUMENTO DE RANGO EXTENDIDO COMO ALTERNATIVA EN LA MEDICIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA EN LA RED DE MEDIA TENSIÓN"**, procede a la autorización del mismo.

Ing. Guillermo Antonio Puente Romero



GUATEMALA, 17 DE ENERO 2012.



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: **TRANSFORMADOR DE INSTRUMENTO DE RANGO EXTENDIDO COMO ALTERNATIVA EN LA MEDICIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA EN LA RED DE MEDIA TENSIÓN**, presentado por el estudiante universitario **Edwin Renato Orellana Avila**, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:

Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
Decano

Guatemala, 19 de octubre de 2012

/gdech



ACTO QUE DEDICO A:

- Dios** Sin cuya presencia omnipresente no hubiera sido posible la elaboración de este trabajo de graduación, entre otras muchas cosas.
- Mi madre** Julia Avila, quien me ha apoyado en toda empresa en que me he embarcado. Me enseñó a no dejar nada inconcluso. Una vez que se enteró de mi inscripción en la Universidad de San Carlos de Guatemala, me dijo que tenía que terminar lo que estaba comenzando.
- Mi esposa** Mercedes Santos, quien con mucho amor ha estado a mi lado ayudándome a elaborar este trabajo de graduación
- Mis hermanos** Jaqueline y Walter, quienes están próximos a trabajar en sus trabajos de graduación.

AGRADECIMIENTOS A:

Dios

Por darme el existir, el entendimiento, la salud, los medios y la entereza de conocer el fenómeno de la electricidad y la forma práctica de hacer del mundo un lugar mejor para todos.

Mi padre

Humberto Orellana, por enseñarme el valor del trabajo.

Mi familia

Por todo lo bueno que me ha enseñado. Por los valores que adquirí en ella.

Mi asesor

Juan Pablo Yoc, por su apoyo desinteresado, dedicación y tiempo invertido para llevar a buen término este trabajo de graduación.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	V
LISTA DE SÍMBOLOS	IX
GLOSARIO	XI
RESUMEN	XV
OBJETIVOS	XVII
INTRODUCCIÓN	XIX
1. TRANSFORMADORES DE INSTRUMENTO TRADICIONALES	1
1.1. Transformadores de instrumento	1
1.1.1. Principios de funcionamiento	2
1.1.2. Partes principales	3
1.1.3. Curva de magnetización	6
1.1.4. Relación de transformación.....	11
1.1.5. Tipos de transformadores de instrumento	14
1.2. Usos de los transformadores de instrumento.....	15
1.2.1. Medición	23
1.2.1.1. Medición en baja tensión	24
1.2.1.2. Medición en media tensión	25
1.2.1.3. Medición en alta tensión.....	26
1.2.2. Protección.....	26
2. TRANSFORMADORES DE INSTRUMENTO DE RANGO EXTENDIDO	29
2.1. Definición de transformador de corriente de rango extendido ..	29

2.1.1.	Mejoras del núcleo del transformador de instrumento de rango extendido	33
2.2.	Tipos de transformadores de corriente de rango extendido	35
2.2.1.	Transformador de instrumento de rango extendido clase 0,15	35
2.2.2.	Transformador de instrumento de rango extendido clase 0,15 superior	36
2.3.	Diagrama del paralelogramo	38
2.4.	Comportamiento del transformador de corriente de rango extendido con cargas fluctuantes	42
3.	NORMATIVA QUE REGULA LOS TRANSFORMADORES DE RANGO EXTENDIDO	47
3.1.	Historia de los transformadores de rango extendido	47
3.2.	Creación de los transformadores de rango extendido	54
3.3.	Normativa ANSI que regula los transformadores de rango extendido	55
3.3.1.	ANSI/IEEE C57.13 1 987	57
3.3.2.	ANSI/IEEE C57.13 2 005	58
4.	COMPARACIÓN ENTRE LOS TRANSFORMADORES DE INSTRUMENTO TRADICIONALES Y LOS TRANSFORMADORES DE INSTRUMENTO DE RANGO EXTENDIDO	77
4.1.	Similitudes entre los transformadores de instrumento tradicionales y los transformadores de instrumento de rango extendido	77
4.2.	Ventajas de los transformadores de rango extendido frente a los transformadores de instrumento tradicionales	79

4.3.	Comparación económica entre los transformadores de instrumento tradicionales y los transformadores de instrumento de rango extendido.....	82
CONCLUSIONES		101
RECOMENDACIONES		103
BIBLIOGRAFÍA.....		105
ANEXOS		107

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Forma de alinearse de los dominios magnéticos	7
2.	Curva de histéresis magnética	8
3.	Circuito equivalente del transformador en general	9
4.	Circuito equivalente simplificado del transformador de voltaje.....	10
5.	Circuito equivalente simplificado del transformador de corriente	11
6.	Devanados primario y secundario de un transformador	13
7.	Transformador de corriente tipo ventana para uso en interiores.....	16
8.	Transformador de corriente tipo barra	17
9.	Transformador de voltaje del tipo arrollado para uso en exteriores	18
10.	Paralelogramo de clase 0,3 para transformadores de voltaje	24
11.	Paralelogramo de clase 0,3 para transformadores de corriente	25
12.	Transformador de corriente con encapsulado de poliuretano	32
13.	Transformador de voltaje con encapsulado CEP	33
14.	Transformador de corriente de rango extendido con encapsulado HCEP	34
15.	Diagrama del paralelogramo de transformador de corriente con clase de precisión 0,15.....	38
16.	Diagrama del paralelogramo de transformador de corriente con clase de precisión 0,15 superior	39
17.	Diagrama del paralelogramo de transformador de voltaje con clase de precisión 0,15.....	40
18.	Gráfica de los puntos 1 a 4 del ejemplo 2.1.....	44
19.	Gráfica del túnel para un transformador clase 0,3	45

20.	Gráfica del túnel para un transformador clase 0,15	46
21.	Características de comportamiento de los transformadores de corriente con la temperatura	59
22.	Características de comportamiento de los transformadores de corriente con la altura	60
23.	Paralelogramo que define el comportamiento del transformador de corriente clase de precisión 0,3	64
24.	Paralelogramo que define el comportamiento del transformador de corriente clase de precisión 0,6	64
25.	Paralelogramo que define el comportamiento del transformador de corriente clase de precisión 1,2	65
26.	Paralelogramo que define el comportamiento del transformador de voltaje con clase de precisión 0,3	65
27.	Paralelogramo que define el comportamiento del transformador de voltaje con clase de precisión 0,6	66
28.	Paralelogramo que define el comportamiento del transformador de voltaje con clase de precisión 1,2	66
29.	Polaridad de los terminales de los transformadores de instrumento	67

TABLAS

I.	Comportamiento de los transformadores de corriente con clase de precisión 0,15	35
II.	Comportamiento de los transformadores de corriente con clase de precisión 0,15 superior	36
III.	Comparación de los dos tipos de transformador de corriente de rango extendido	37

IV.	<i>Burden</i> normalizado para transformadores de corriente con 5 amperios en el secundario funcionando a 60 hertzios	41
V.	Puntos de prueba para transformadores de instrumento de rango extendido	42
VI.	Comparación de las tres clases de precisión para transformadores de corriente.....	61
VII.	Comparación del ángulo de las tres clases de precisión para transformadores de corriente	62
VIII.	Comparación del comportamiento de las diferentes clases de precisión de transformadores de voltaje.....	63
IX.	<i>Burden</i> estandarizados para transformadores de corriente utilizados en medición con 5 amperios en el arrollamiento secundario	69
X.	<i>Burden</i> estandarizados para transformadores de voltaje utilizados en medición.....	70
XI.	Puntos específicos para pruebas de clase de precisión de los transformadores de instrumento de rango extendido	74
XII.	Tabla de costos de inversión en unidades de medición trifásica en dólares estadounidenses	93
XIII.	Tabla del proyecto de adquirir transformadores tradicionales.....	96
XIV.	Tabla del proyecto de adquirir transformadores de rango extendido funcionando al 100 por ciento de su capacidad	97
XV.	Tabla del proyecto de adquirir transformadores de rango extendido funcionando al 10 por ciento de su capacidad	98

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
A	Amperios
Y	Conexión estrella
I	Corriente
\$	Dólar estadounidense
hertzios	Hertzios
Δi	Incerteza de corriente
ΔP	Incerteza de potencia
ΔV	Incerteza de voltaje
kW	Kilovatio
kWh	Kilovatio-hora
kV	Kilovoltios
%	Porcentaje
P	Potencia
H₁	Primer terminal primario
X₁	Primer terminal secundario
Q.	Quetzales
H₂	Segundo terminal secundario
X₂	Segundo terminal secundario
V	Voltaje

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 <i>Coulomb</i> de carga, por un punto dado de un circuito eléctrico, en un segundo.
ANSI	Letras iniciales, en Idioma Inglés, del Instituto Nacional Norteamericano de Estándares.
Bobina	Conjunto de alambres enrollados en torno a un eje común utilizados para generar campos magnéticos.
Circuito	Conjunto de dispositivos eléctricos conectados entre sí para que por ellos circule una corriente eléctrica, de tal cuenta que puedan ser usados para un fin útil.
Consumo	Cantidad de kilovatios-hora que un determinado usuario ha tomado de la red en un período dado de tiempo, generalmente un mes.
<i>Coulomb</i>	Unidad de medida de la carga eléctrica equivalente a $1,28 \times 10^{18}$ electrones o protones.

Demanda	Requerimiento, en kilovatios, que un determinado usuario hace al sistema de distribución de energía eléctrica en un momento dado.
Fase	Cada uno de los cables del servicio de distribución por el que se desplaza una onda de corriente alterna.
IEEE	Iniciales en idioma inglés del Instituto de Ingenieros Electricistas y en Electrónica.
Kilovatio	Unidad de medida de la potencia eléctrica equivalente a cuando, en un circuito eléctrico de un voltio, circula una corriente de un amperio.
Kilovatio-hora	Unidad de medida de la energía eléctrica equivalente a una demanda de un kilovatio durante una hora.
Kilovoltio	Magnitud de voltaje equivalente a mil voltios.
Medición con equipo auxiliar	Tipo de medición que necesita un equipo que auxilie al medidor de energía eléctrica.
Monofásico	Servicio de energía eléctrica que utiliza únicamente una fase para funcionar.
Transformador	Dispositivo eléctrico utilizado ampliamente en el transporte y distribución de energía eléctrica debido a la particularidad de que es capaz de aumentar y reducir los valores de voltaje de la corriente alterna.

Transformador de instrumento	Transformador que se usa en la medición de energía eléctrica.
Transformador reductor	Tipo de transformador que se utiliza para disminuir la magnitud de voltaje o corriente.
Trifásico	Servicio de energía eléctrica que utiliza las tres fases del sistema de distribución para funcionar.
Vatio	Unidad de medida de la potencia
Vatio-hora	Unidad de medida de la energía eléctrica.
Voltio	Unidad de medida del voltaje.

RESUMEN

Por lo general, se considera que los transformadores de instrumento tienen una relación de transformación fija, es decir, que no varía con la carga. Sin embargo, eso no es así; sobre todo, cuando la carga es menor al 10 por ciento para el que se diseñaron o se supera su valor nominal. Por otra parte, los medidores electrónicos no son adecuados para conectarse a los transformadores de instrumento tradicionales.

Por el contrario, los transformadores de instrumento de rango extendido, pueden ser diseñados para mantener su relación de transformación desde el 1 por ciento de la carga o menos y son excelentes para auxiliar a los transformadores electrónicos. Además, al usar medidores electrónicos, la medición de energía eléctrica es más exacta. Las características anteriores le hacen muy conveniente para utilizarse en lugares con carga muy variable, puntos de intercambio y otros en donde la exactitud es muy importante.

Los transformadores de instrumento de rango extendido son más caros que los transformadores instrumento tradicionales, sin embargo, la diferencia económica entre la utilización de los unos o los otros, puede recuperarse fácilmente en un período de tiempo menores a un año.

Por si fuera poco, los transformadores de instrumento hacen más fácil el reemplazar una unidad dañada, ayudan a reducir la cantidad de transformadores de instrumento necesarios en plaza y reducen los multiplicadores que deben tener los medidores de energía eléctrica.

Con solamente algunos juegos de transformadores con relación de transformación 100:5, 1 200:5 y 12 000:5 las empresas distribuidoras de energía eléctrica y comercializadoras, pueden estar totalmente cubiertas para atender cualquier requerimiento de mantenimiento de una unidad dañada, o bien, conectarle a un nuevo cliente; no necesitarán tener toda la gama de relaciones de transformación que requiere el uso de los transformadores de instrumento tradicionales.

Como puede observarse, los transformadores de instrumento de rango extendido son una alternativa muy recomendable para toda empresa que se dedique a la distribución o comercialización de energía eléctrica. Por otra parte, los clientes pueden estar seguros que se les está midiendo de una manera más precisa.

OBJETIVOS

General

Contrastar el uso de los transformadores de instrumento de rango extendido contra los transformadores de instrumento tradicionales, como una alternativa hacia el mejoramiento de la medición y la optimización del uso de la energía.

Específicos

1. Determinar la normativa que hace posible la existencia de los transformadores de corriente de rango extendido.
2. Describir los transformadores de instrumento de rango extendido.
3. Comparar los transformadores tradicionales contra los transformadores de rango extendido.
4. Indicar los casos en que se puede utilizar los transformadores de corriente de rango extendido.
5. Mostrar el mejoramiento de la medición de energía eléctrica cuando se utilizan transformadores de corriente de rango extendido.

INTRODUCCIÓN

Para la medición de energía eléctrica en media tensión se utilizan las mediciones con equipo auxiliar debido a la magnitud que puede tomar el voltaje y la corriente. El equipo auxiliar que por excelencia se utiliza es el transformador instrumento, los cuales pueden ser de tensión o de corriente.

El desarrollo tecnológico de los dispositivos electrónicos ha alcanzado a los medidores de energía eléctrica, de tal manera que prácticamente ya nadie produce medidores electromecánicos o de inducción. Dicho alcance ha representado un cambio en las mediciones de energía eléctrica con equipo auxiliar puesto que los nuevos medidores tienen características distintas. En los países industrializados, la legislación ha cambiado y ha empezado a favorecer el uso de medidores electrónicos y medición inteligente, lo cual conlleva la necesidad de cambiar el equipo auxiliar utilizado para la medición de energía.

De este modo, se ha desarrollado también equipo auxiliar con características distintas para utilizarse con los nuevos medidores y al mismo tiempo garantizar una mayor precisión. Dicho equipo auxiliar desarrollado recientemente recibe el nombre de transformadores de instrumento de rango extendido. El presente trabajo de graduación trata acerca de ellos y de las ventajas que representa la utilización de los mismos. Con ellos se logra, una medición más exacta que con los transformadores de instrumento tradicionales.

1. TRANSFORMADORES DE INSTRUMENTO TRADICIONALES

Los transformadores de instrumento tradicionales se han usado a lo largo de los años en las compañías distribuidoras de energía. Han estado con ellas desde que se inició su producción cuando usaban aislamiento de aceite, posteriormente, los primeros con aislamiento con resina del tipo epóxico y el moldeo a presión y terminando hasta nuestros días con los del tipo polímero. Este primer capítulo tratará sobre los transformadores de instrumento de hoy en día.

1.1. Transformadores de instrumento

Generalmente no es posible conectar directamente los medidores o instrumentos de protección directamente a los circuitos de alta tensión de subestaciones y redes de distribución; los altos voltajes y corrientes impiden hacerlo. Por razones de seguridad y de costo, no es práctico diseñar un medidor o un instrumento de protección que funcione con altos voltajes. En lugar de ello se diseñan para funcionar con voltajes bajos como 120 voltios o menos. Por esta razón se requiere de un transformador que reduzca los valores elevados de voltaje o corriente a valores que puedan ser empleados por los diferentes instrumentos de medición. Los transformadores utilizados para tal fin son los transformadores de instrumento.

De lo anterior se entiende que, los transformadores de instrumento son transformadores reductores. Además, estos transformadores tienen características particulares de funcionamiento, tales como: ser extremadamente exactos y

tener un comportamiento lineal en el rango de valores para los cuales están diseñados. La necesidad de lo anterior se debe a que del funcionamiento exacto de cada uno de ellos depende el correcto accionamiento de circuitos que protegen equipos de costo bastante elevado o bien se depende de ellos para tener una correcta medición que en ocasiones puede representar grandes sumas de dinero.

La importancia de una correcta medición aumenta a medida que crece la cantidad de energía que es medida. Por ejemplo, si se supone que se va a medir 100 kilovatio-hora con una exactitud del 2 por ciento, el valor de la medición variará típicamente entre los valores de 98 kilovatio-hora y 102 kilovatio-hora, es decir, que podría haber un rango de 4 kilovatio-hora, y si el costo de cada kilovatio-hora fuera de Q.1,50, el rango sería de unos Q.6,00. De igual manera, si se supone que se va a medir 10 gigavatios-hora con una exactitud del 2 por ciento, el valor de la medición variará típicamente entre los valores de 9,8 gigavatios-hora a 10,2 gigavatios-hora, es decir, el rango sería de 0,4 gigavatios-hora y si el costo también fuera de Q.1,50 / kilovatio-hora, el rango sería de unos Q.600 000,00.

1.1.1. Principios de funcionamiento

Los principios de funcionamiento del transformador de instrumento son los relacionados con el fenómeno electromagnético. Como cualquier otro transformador eléctrico, es la inducción electromagnética la que hace posible su correcto funcionamiento.

La ley de inducción electromagnética de Faraday-Lenz, llamada también ley de Faraday, establece que el voltaje inducido en un circuito cerrado es directamente proporcional a la rapidez con que cambia en el tiempo el flujo

magnético que atraviesa una superficie cualquiera con el circuito como borde. En términos prácticos, la ley establece que para inducir un voltaje se necesita:

- Un campo magnético cambiante en el tiempo que atraviese la superficie que utiliza el circuito como borde
- Un movimiento relativo entre el campo magnético y la superficie
- Los dos anteriores

O en forma de ecuación:

$$\varepsilon = - \frac{d\Phi_B}{dt} \quad (\text{Ecuación 1.1})$$

En donde, ε es el voltaje inducido $\frac{d\Phi_B}{dt}$ es la derivada del campo magnético con respecto al tiempo.

El signo negativo en la ecuación se debe a que el voltaje inducido tiende a generar una corriente cuyo campo magnético producido se opondrá al que lo produjo.

1.1.2. Partes principales

Las partes principales de un transformador de instrumento son:

- Arrollamiento primario

El arrollamiento primario es el arrollamiento que recibe la energía directamente de la fuente. Hablando de transformadores de instrumento, se

trata del arrollamiento que recibe la energía que se quiere medir o bien se requiere monitorear. De los arrollamientos es el más robusto.

Algunos transformadores de instrumento no tienen arrollamiento primario, o bien es el mismo conductor por donde circula la corriente a medir o monitorear el que hace las veces de arrollamiento primario.

- Arrollamiento secundario

Es el arrollamiento que se conecta a los aparatos de medición o de protección. Tiene una sección inferior al arrollamiento secundario. Debe proporcionar valores de voltaje o corriente que reflejen fielmente los valores del lado primario.

- Núcleo

Generalmente ambos, el arrollamiento primario y el arrollamiento secundario, están devanados sobre un núcleo de material ferromagnético. En otros casos, únicamente el arrollamiento secundario es el que está devanado sobre el núcleo y dentro de este se colocará el o los cables de alimentación, constituyéndose los cables de alimentación como el arrollamiento primario.

Los núcleos ferromagnéticos se construyen de láminas y no de barras macizas para evitar pérdidas de potencia en forma de calor. El núcleo sirve principalmente para enlazar magnéticamente los arrollamientos primario y secundario. Ya que no están conectados eléctricamente entre sí los arrollamientos, toda la energía debe pasar del uno al otro por medio del núcleo utilizando la inducción magnética. La inducción magnética en el núcleo también

produce corrientes no deseadas en el mismo, llamadas corrientes parásitas. Dichas corrientes representan pérdida de energía.

- Encapsulado

El encapsulado es el medio aislante que se utiliza para proteger al transformador de instrumento, le da rigidez mecánica y eléctrica. Por medio del encapsulado se busca también cumplir las libranzas requeridas para que no se produzcan descargas parciales ni arcos. La forma del encapsulado de los transformadores de instrumento puede tener formas ondulantes dependiendo del nivel de tensión.

El encapsulado está fabricado con polímeros, generalmente de poliuretano, aunque también se fabrica de material tipo epóxico cicloalifático. Otro material que se usa y que presenta características superiores al poliuretano es el epóxico hidrofóbico cicloalifático o bien, HCEP (*hydrophobic cycloaliphatic epoxy* en idioma inglés). El HCEP tiene la particularidad de repeler el agua.

- Terminales

Los terminales son partes en las que también se pueden presentar pérdidas y destrucción debido al calentamiento. Los valores altos de corriente hacen que se presenten altas temperaturas. Por tal razón se construyen de materiales que sean muy buenos conductores. Tales como el cobre con plateado electrolítico.

1.1.3. Curva de magnetización

Un material ferromagnético, tal como el material con que se hacen los núcleos de los transformadores, se puede considerar como compuesto de una infinidad de dominios magnéticos o pequeños imanes. De forma natural, todos los dominios están desordenados y, por tanto, el material no presenta ninguna polaridad.

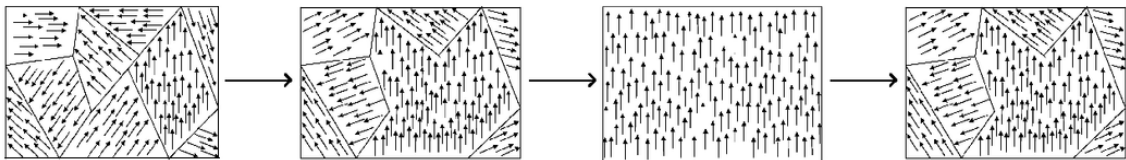
Al momento en que un material ferromagnético es afectado por un campo magnético, los dominios tienden a alinearse con el campo magnético y se alinean tantos como el campo magnético lo permite. Una mayor intensidad de campo magnético producirá el alineamiento de una mayor cantidad de dominios. Sin embargo, hay un punto en el que, por más intenso que sea un campo magnético, no se podrá alinear uno más de los dominios. En ese punto se dice que el material ferromagnético está saturado.

Si el campo magnético se retira después, los dominios del material ferromagnético tenderán a estar nuevamente en desorden; sin embargo, habrá una cantidad de ellos que quedará alineados en el sentido que estaba el campo magnético, constituyendo un magnetismo remanente y el material estará ahora imantado, es decir, se comportará como un imán.

Los transformadores de instrumento, al contar con un núcleo ferromagnético también son afectados por el fenómeno anteriormente descrito, llamado histéresis magnética, con la particularidad de que el campo magnético varía con el tiempo. Al estar conectados a un sistema de corriente alterna, se ven afectados por campos magnéticos que cambian tanto de intensidad como de dirección. Una gráfica que muestra el comportamiento del núcleo, cuando se

conecta a la red, es llamada curva de histéresis magnética o simplemente curva de histéresis.

Figura 1. **Forma de alinearse de los dominios magnéticos**



Fuente: modificado de http://es.wikipedia.org/wiki/Dominio_magn%C3%A9tico.

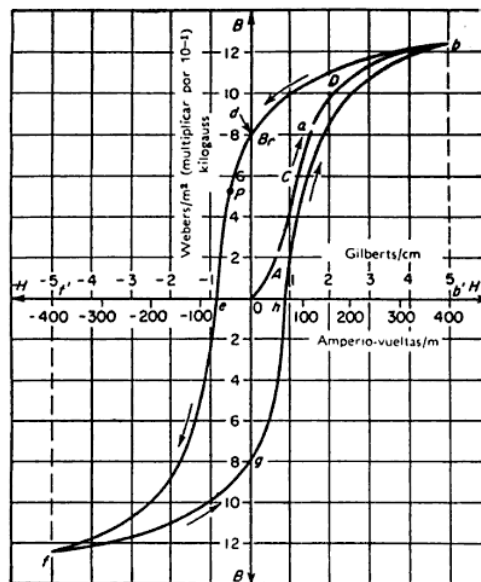
Consulta: 20 de febrero de 2011.

Para entender el comportamiento del núcleo basta con recorrer el lazo que forma la curva de histéresis (ver figura 2). El punto “a” representa el punto en el que el material no ha sido sometido a ningún campo magnético. Del origen al punto “b” el material es sometido a un campo magnético que aumenta de intensidad desde el origen hasta el punto “b”, punto en el cual el material está saturado y por tanto una intensidad mayor de campo magnético no producirá variación en el flujo del campo magnético dentro del material.

Del punto “b” al punto “d” la intensidad de campo magnético disminuye hasta que en el punto “d” es cero. Obsérvese que en dicho punto “d”, aunque no hay intensidad alguna, en el núcleo hay un flujo magnético remanente llamado comúnmente magnetismo remanente. El magnetismo remanente en los núcleos de los transformadores de instrumento es casi nulo. Del punto “d” al “f” el flujo magnético cambia de dirección. En el punto “f” el núcleo nuevamente llega a su estado de saturación por la gran intensidad del campo aunque en sentido contrario al punto “b”.

Del punto “f” al punto “g” nuevamente la intensidad del campo disminuye hasta que llega a cero. El punto “g” corresponde nuevamente al magnetismo remanente del núcleo. Por tanto, en el siguiente el comportamiento del núcleo se movilizará desde “b” hasta “g” sin pasar por el origen.

Figura 2. **Curva de histéresis magnética**



Fuente: DAWES, Chester L. Electricidad Industrial, Volumen 1. Editorial Reverté.

http://books.google.com.gt/books/about/Electricidad_Industrial.html?id=AzYQuHTEOAC&redir_esc=y. Consultado el 20 de febrero de 2011.

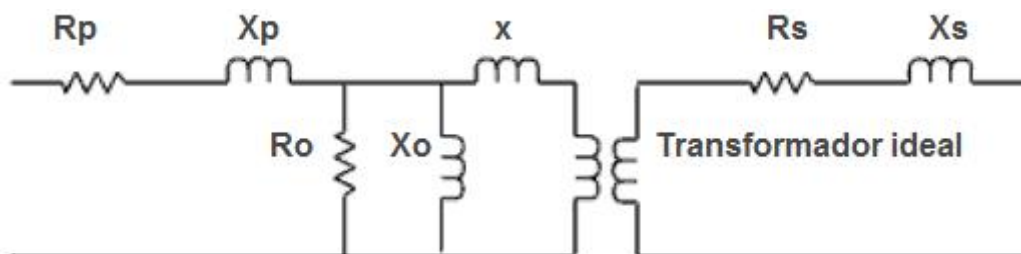
Debido a que un transformador de instrumento debe funcionar linealmente en rangos específicos de voltaje o corriente, deberá diseñarse para que no llegue nunca a la región de saturación. En los transformadores de distribución es importante que no se llegue al punto de saturación por las altas pérdidas que esto provoca, aunque del lado primario se aumente la intensidad del campo magnético debido al aumento de la corriente y/o cantidad de vueltas, no se conseguirá que toda la energía que se le introduce al devanado primario llegue

hasta el devanado secundario en virtud de la saturación y que por tanto, no llegue en forma de magnetismo.

En los transformadores de instrumento se trata de lo mismo solo que en ese caso, los transformadores de instrumento no reproducirán fielmente la característica que interesa del lado primario (voltaje o corriente según sea el caso). Por tanto, el transformador de instrumento no debe nunca trabajar bajo condiciones de saturación.

Dentro del circuito equivalente de un transformador la curva de histéresis magnética tiene su representación en una reactancia de valor variable que aumenta su valor conforme aumenta la saturación. En el circuito equivalente se llamará a dicha reactancia "x". El hecho de que x sea mayor conforme aumenta la saturación se debe a que, conforme aumenta la saturación, una menor cantidad de flujo magnético llegará del lado primario al lado secundario del transformador. Los otros componentes del circuito equivalente representan las pérdidas del transformador: las pérdidas en los conductores, pérdidas por corrientes parásitas, pérdidas por el reacomodo de los dominios y pérdidas por dispersión del flujo.

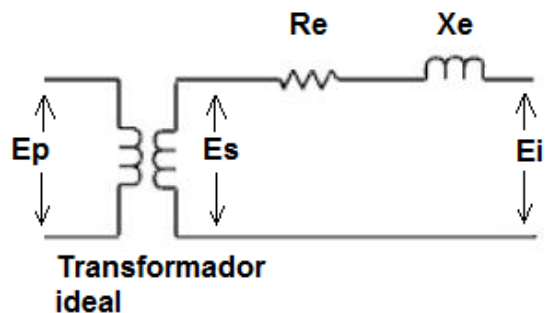
Figura 3. **Circuito equivalente del transformador en general**



Fuente: modificado de CHAPMAN, Stephen J. Máquinas Eléctricas. p.85.

A los transformadores de instrumento generalmente se le conectan instrumentos de medición o protección, constituyendo una carga para el transformador llamada “burden”, que junto con los cables los conectan al transformador, determinan el comportamiento del mismo. Para determinar el comportamiento del transformador de instrumento, el circuito equivalente del transformador se simplifica, dando como resultado el denominado circuito equivalente simplificado del transformador.

Figura 4. **Circuito equivalente simplificado del transformador de voltaje**



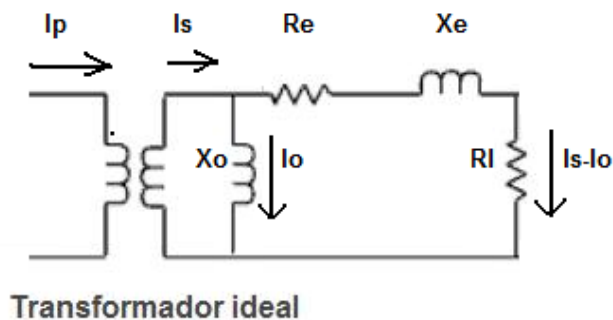
Fuente: modificado de CHAPMAN, Stephen J. Máquinas Eléctricas. p.85.

En el circuito equivalente simplificado del transformador de voltaje se puede observar que el voltaje que llegue a los instrumentos no será exactamente el valor ideal; del valor de este dependerá de la resistencia equivalente, incluida la resistencia de los cables y por otra parte, tendrá un desplazamiento en grados. Existen normas que indican cuanto puede variar, en porcentaje, un valor dado de voltaje y cuál será su desplazamiento permitido.

Por otra parte, en el circuito equivalente simplificado del transformador de corriente se puede observar que la corriente que llega a los instrumentos

tampoco será el valor ideal. De igual manera que sucede con el transformador de voltaje, la corriente secundaria típicamente variará un valor porcentual y habrá un desplazamiento. En las figuras 10 y 11 se podrá observar los paralelogramos que definen el comportamiento para transformadores de instrumento clase 0,3.

Figura 5. **Circuito equivalente simplificado del transformador de corriente**



Fuente: modificado de CHAPMAN, Stephen J. Máquinas Eléctricas. p.85.

1.1.4. Relación de transformación

Como se vio anteriormente, cuando se aplica corriente al devanado primario de un transformador de instrumento se producirá un campo magnético cuyo flujo recorrerá el núcleo y llegará al devanado secundario. Entonces, se inducirá un voltaje en el devanado secundario y si se conecta una carga o *burden* al devanado secundario, circulará por él una corriente. Obsérvese la figura 6.

Como todo el flujo que sale del lado primario llega idealmente al lado secundario, se podría decir que la fuerza magnetomotriz en ambos es la misma y será igual a:

$$N_p \times I_p = N_s \times I_s \quad (\text{Ecuación 1.2})$$

$$\frac{N_p}{N_s} \times I_p = I_s \quad (\text{Ecuación 1.3})$$

En donde:

N_p : número de vueltas del arrollamiento primario

I_p : corriente del lado primario, en amperios

N_s : número de vueltas del arrollamiento secundario

I_s : corriente del lado secundario, en amperios

Si se define:

$$a = \frac{N_p}{N_s} \quad (\text{Ecuación 1.4})$$

En donde:

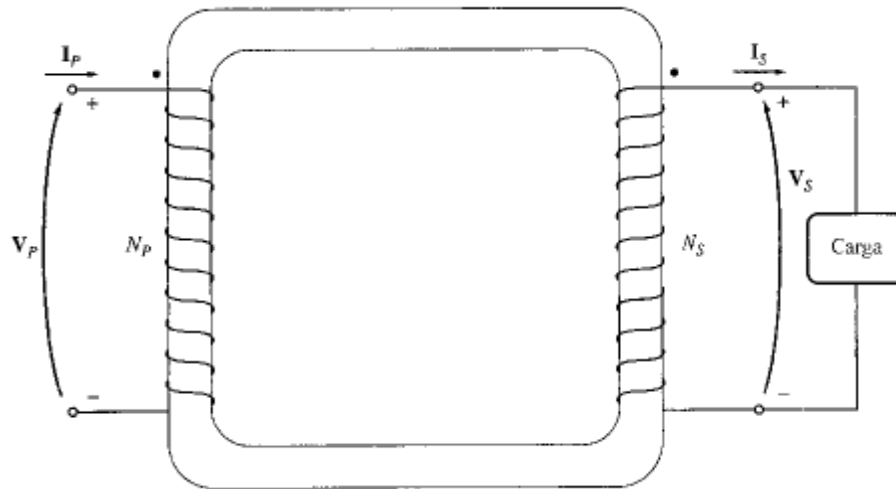
a = relación de transformación

Entonces:

$$I_s = a \times I_p \quad (\text{Ecuación 1.5})$$

La relación de transformación no es más que la relación existente entre el número de vueltas del arrollamiento primario y el arrollamiento secundario. Por tanto, para cualquier transformador cuyo núcleo no esté saturado, el comportamiento entre la corriente del lado primario y la corriente del lado secundario será lineal.

Figura 6. **Devanados primario y secundario de un transformador**



Fuente: modificado de CHAPMAN, Stephen J. Máquinas Eléctricas. p.82.

Para todo transformador de instrumento es indispensable que dicha linealidad no se pierda en todo el rango en el cual el transformador funciona. En otras palabras, el valor de la relación de transformación no cambia bajo ninguna circunstancia normal de funcionamiento.

Los voltajes primario y secundario guardan también una relación parecida con la relación de transformación. Si se considera que la potencia de entrada debe ser igual a la potencia de salida se tiene:

$$V_s \times I_s = V_p \times I_p \quad \text{(Ecuación 1.6)}$$

$$V_s \times \frac{I_s}{I_p} = V_p \quad \text{(Ecuación 1.7)}$$

Como:

$$I_s = a \times I_p \quad \text{(Ecuación 1.8)}$$

$$\frac{I_s}{I_p} = a \quad (\text{Ecuación 1.9})$$

Entonces:

$$V_s \times a = V_p \quad (\text{Ecuación 1.10})$$

Para los transformadores de instrumento lo común será encontrar dentro de sus características la relación de transformación expresada como un cociente, o lo que sería igual a las siguientes dos ecuaciones:

$$\frac{V_p}{V_s} = a \quad (\text{Ecuación 1.11})$$

O bien

$$\frac{I_p}{I_s} = \frac{1}{a} \quad (\text{Ecuación 1.12})$$

Por ejemplo, si se habla de un transformador que convierte el voltaje de 8 400 a 120 voltios expresado como una relación, tal como 8 400/120; o bien, si se trata de un transformador que convierte el voltaje de 120 a 5 voltios, 120:5 o también se puede hablar de un transformador que convierte la corriente de 25 a 5 amperios expresado como una relación, tal como 25/5 o bien 25:5. Todo dependerá del tipo de transformador de instrumento del cual se trate.

1.1.5. Tipos de transformadores de instrumento

Los transformadores de instrumento se pueden dividir en varios grupos atendiendo a varios criterios de clasificación. Uno de los criterios más importantes para dividir transformadores de instrumento en sus tipos depende de lo que el transformador de instrumento vaya a estar transformando, así se puede hablar de:

- Transformadores de corriente
- Transformadores de voltaje

Otro de los criterios principales para clasificar transformadores de instrumento los divide según el uso que se les dé, así se puede clasificar en:

- Transformadores para medición
- Transformadores para protección

Además de lo anterior, también se puede hablar de diferencias en cuanto a construcción, de tal forma que se tiene:

- Transformadores tipo barra
- Transformadores tipo ventana, comúnmente llamados tipo dona
- Transformadores tipo boquilla

También existe otra clasificación más amplia acorde al material del encapsulado, aunque generalmente se trata de poliuretano o CEP; existen para interior y para exterior. También los existen en varios rangos de precisión. Cuando se escoge el mejor transformador de instrumento que satisfaga requerimientos específicos, se debe considerar todas las alternativas anteriores para encontrar el que mejor se adapta.

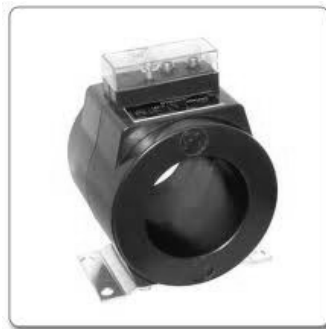
1.2. Usos de los transformadores de instrumento

Los usos que se les da a los transformadores de instrumento son medición y protección. Dependiendo del uso que se les dé se requerirá que los transformadores de instrumento cumplan ciertas características. Para entender mejor se hablará de dichas características.

- Tipo de construcción del primario

Según la manera en que se conecte magnéticamente el arrollamiento primario, se puede tener tres formas distintas para los transformadores de instrumento. Pueden ser del tipo ventana, tipo barra o tipo arrollado.

Figura 7. **Transformador de corriente tipo ventana para uso en interiores**



Fuente: <http://www.alibaba.com/trade/search?SearchText=instrument+transformer&IndexArea=Products&fsb=y>. Consulta: 21 de noviembre de 2011.

- Tipo ventana

En este tipo de construcción el primario no se conecta a ningún borne del transformador de instrumento, es decir, el primario no es parte de la estructura del transformador. En lugar de ello, se hace pasar el cable primario dentro del núcleo que tiene forma de anillo y en el cual se encuentra devanado el secundario.

Se utiliza con conductores primarios totalmente aislados y en equipos donde el conductor es componente o parte de otro aparato, como por ejemplo

en aplicaciones en las que se tiene celdas de transformación en los que cada gabinete tiene una parte del sistema del centro de transformación, como puede ser el transformador, la transferencia, etc. Su uso se limita únicamente a los transformadores de corriente.

Figura 8. **Transformador de corriente tipo barra**



Fuente: <http://www.alibaba.com/trade/search?SearchText=instrument+transformer&IndexArea=Products&fsb=y>. Consulta: 21 de noviembre de 2011.

- Tipo barra

Este tipo de construcción es muy parecido al tipo ventana, con la diferencia de que para su conexión presenta terminales tipo barra. Es decir, el primario se conecta a una barra que está permanentemente insertada dentro de la ventana del transformador de instrumento. Su uso se limita exclusivamente a los transformadores de corriente. También se le conoce como transformador de corriente con barra pasante.

- Tipo arrollado

Esta forma de construcción es utilizada para construir tanto transformadores de corriente como transformadores de voltaje. Presenta la

ventaja de que se puede conectar a voltajes altos. En este tipo de construcción el devanado primario está aislado y enrollado permanentemente alrededor del núcleo. El devanado secundario también se encuentra aislado y enrollado permanentemente sobre el núcleo. Los dos devanados se encuentran uno sobre otro de tal manera que el flujo de dispersión entre ambos arrollamientos sea mínimo.

Figura 9. **Transformador de voltaje del tipo arrollado para uso en exteriores**



Fuente: <http://www.alibaba.com/trade/search?SearchText=instrument+transformer&IndexArea=Products&fsb=y>. Consulta: 21 de noviembre de 2011.

- Localización en la instalación

Los transformadores de instrumento se diseñan para servicio en interiores y también para exteriores. Los que se diseñan para exteriores deberán soportar las inclemencias del tiempo mientras que los diseñados para exteriores no tendrán tal capacidad.

- Voltaje del sistema

El voltaje del sistema establece el voltaje para el cual debe estar diseñado el transformador de instrumento. Es importante tanto para los transformadores de corriente como para los transformadores de voltaje, siendo más importante para los últimos debido a que dicha magnitud es la que interesa que transformen.

Los transformadores de voltaje traen definido si pueden ser conectados en arreglos trifásicos entre fases o línea a tierra o si solamente se pueden conectar entre línea a tierra.

- Relación de transformación

La relación de transformación tiene dos connotaciones, tanto en transformadores de corriente como en transformadores de voltaje. Como se vio anteriormente, la relación de transformación viene definida por dos números separados por una diagonal “/” o dos puntos “:”, el número que se encuentra del lado izquierdo indicará la relación de las vueltas, tal como 70/1 (setenta a uno) o bien 5:1 (cinco a uno).

La otra connotación se refiere a la relación nominal para la cual se fabricó un transformador de instrumento. Para un transformador de voltaje por ejemplo: 8 400/120 (ocho mil cuatrocientos a ciento veinte) indicará que el transformador de voltaje se diseñó para trabajar a 8 400 voltios en el lado primario y que, debido a la relación de transformación, también está diseñado para trabajar con 120 voltios en el lado secundario. También para un transformador de corriente, por ejemplo: 25:5 (veinticinco a cinco) indicará que el transformador de corriente

está diseñado para funcionar con veinticinco amperios del lado primario y para trabajar con cinco amperios del lado secundario.

- Precisión

Se define la precisión de un transformador de instrumento como la diferencia porcentual entre la magnitud real (voltaje o corriente según si se trata de un transformador de voltaje o uno de corriente) y la magnitud nominal del secundario. La precisión que se requerirá de un transformador de instrumento dependerá del uso que se le dé al mismo. Existen transformadores de instrumento cuya precisión es bastante alta en casi cualquier condición de carga, se dirá que son de rango extendido o de alta precisión.

- Medida

Los transformadores de instrumento utilizados para medición deberán ser más precisos que los transformadores de instrumento utilizados para protección. Típicamente, la precisión de un transformador de instrumento para medida será del 0,3 por ciento según la normativa IEEE y de 0,2 por ciento según la normativa IEC. Para los transformadores de instrumento utilizados en medición también interesará la variación en el ángulo de fase expresada en minutos.

- Protección

Los transformadores de instrumento utilizados para protección tienen un rango más amplio para la precisión y la precisión se identifica de manera distinta que para los transformadores de instrumento usados en medición. Para los primeros se tratará de una letra acompañada de un número, los cuales

indicarán un porcentaje. Típicamente, la precisión de un transformador de instrumento para protección será del 10 por ciento según la normativa IEEE.

- *Burden*

Se definirá *burden* como la carga que se le puede conectar al transformador de instrumento del lado secundario de tal manera que no se vea afectado su comportamiento. El *burden* incluirá todos los componentes del circuito del lado secundario y estará dado para una precisión dada. Es decir, si se excede el *burden* de un transformador, no tendrá la precisión nominal. El término *burden* se utiliza para no confundirlo con el término “carga”, que se refiere a los aparatos que están siendo medidos o controlados.

- Capacidad de sobrecorriente de corta duración

Para los transformadores de corriente existe otra característica que es la capacidad de sobrecorriente de corta duración. Una sobrecorriente será una corriente superior a la corriente para la cual se diseñó el transformador de corriente. Regularmente se indica como una cantidad de veces la corriente nominal, como por ejemplo $100 \times I_{nom}$ (cien veces el valor de la corriente nominal). La hay de dos tipos:

- Capacidad térmica

Es la magnitud de corriente que puede pasar por el primario de un transformador de corriente en un segundo, con el circuito del devanado secundario cortocircuitado, sin exceder los límites de temperatura de ninguno de los devanados, primario ni secundario.

- Capacidad mecánica

Es la magnitud de corriente que el transformador de corriente puede soportar con el devanado secundario cortocircuitado sin sufrir ningún daño debido a esfuerzos mecánicos.

- Nivel básico de aislamiento

El nivel básico de aislamiento dependerá del voltaje del sistema en el que estarán conectados los transformadores de instrumento. Quedará definido el nivel básico de aislamiento que indique la norma para el voltaje específico del sistema.

- Frecuencia

La frecuencia es un factor crítico al momento de definir los parámetros de operación de un transformador de instrumento. Al observar el circuito equivalente se puede observar que se tienen reactancias inductivas y éstas dependen de la frecuencia del sistema.

Si se trata de transformadores de voltaje se altera la capacidad de sobrevoltaje. Por ejemplo, si están diseñados para 50 hertzios no deben nunca conectarse en 60 hertzios al mismo voltaje y si están diseñados para funcionar con 60 hertzios y se conectan en 50 hertzios la capacidad de soportar sobre voltajes se reduce en un 20 por ciento.

Y si se trata de transformadores de corriente se verá afectada la precisión del transformador, es decir, se perderá la relación de transformación y, en otras palabras, la medición no servirá.

- Factor de sobrecarga

Es un valor numérico por el cual se debe multiplicar la capacidad nominal de un transformador de instrumento para encontrar la máxima magnitud a la cual el transformador de instrumento puede operar continuamente sin sufrir daño. Por ejemplo, un transformador de corriente con un factor de sobre carga 1,5 y valor nominal de 100 amperios, puede funcionar sin problema en valores inferiores a 150 amperios.

1.2.1. Medición

Uno de los usos que se le da a los transformadores de instrumento es el de la medición. La medición de energía eléctrica requiere que la precisión de los transformadores de instrumento sea más grande que cuando se utilizan para protección. Según la normativa IEEE es común 0,3 como la precisión para un transformador de corriente utilizado para medición. Lo anterior se interpreta como que se acepta un error de tan solo $\pm 0,3$ por ciento.

Otro parámetro importante para los transformadores de instrumento es el ángulo de desfase medido en minutos. La importancia de este ángulo de desfase se entiende si se piensa en él como en el factor de potencia. El factor de potencia nace de un desfase entre el voltaje y la corriente y en transformadores de instrumento es entre el voltaje o corriente de entrada y el voltaje o corriente de salida.

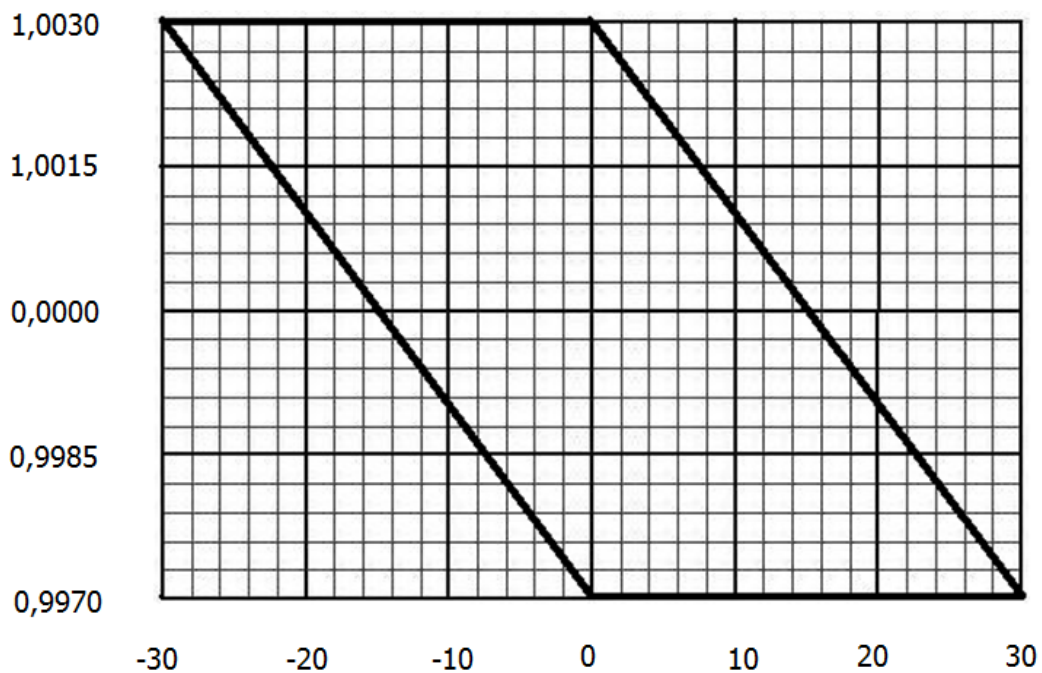
Es importante que todo transformador de instrumento funcione según alguna norma. Dentro de la normativa IEEE el funcionamiento de todo transformador de instrumento debe estar circunscrito al paralelogramo básico correspondiente a cada clase. En las figuras 10 y 11 se observan los

paralelogramos de clase 0,3 para transformadores de corriente y transformadores de voltaje.

1.2.1.1. Medición en baja tensión

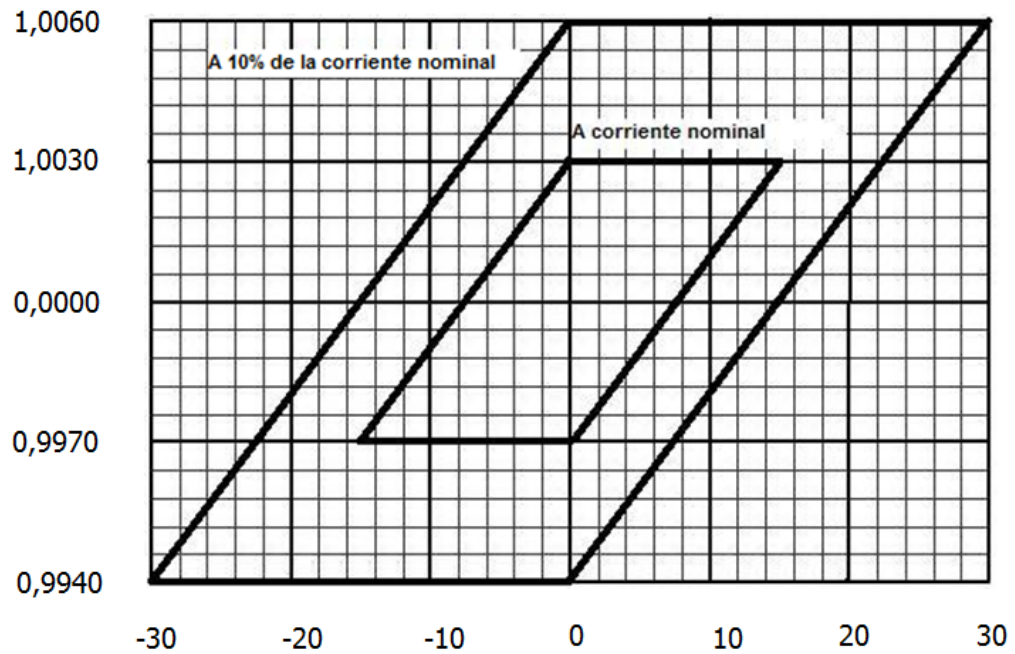
Para la medición en baja tensión generalmente se utiliza equipo de medición autocontenido. Es decir, que no necesita ningún tipo de instrumento extra para la medición de energía, basta con conectar el medidor de energía eléctrica. Sin embargo, cuando la corriente del sistema en que se quiere medir la energía sobrepasa la capacidad del medidor, se utiliza medición con equipo auxiliar de medición.

Figura 10. **Paralelogramo de clase 0,3 para transformadores de voltaje**



Fuente: elaboración propia, con datos de la Norma ANSI/IEEE C57.13.6.

Figura 11. **Paralelogramo de clase 0,3 para transformadores de corriente**



Fuente: elaboración propia, con datos de la Norma ANSI/IEEE C57.13.6.

Debido a que ya se trabaja con baja tensión, se recurre únicamente al uso de transformadores de corriente que bien pueden ser del tipo barra o del tipo ventana. Del tipo ventana se tienen varios tamaños que se pueden ajustar a la cantidad y calibres de los conductores. En este caso son muy prácticos puesto que no es necesario conectar los cables primarios a ningún devanado.

1.2.1.2. **Medición en media tensión**

Cuando el voltaje del sistema en que se quiere medir la energía eléctrica no es en baja tensión sino en media tensión se podrá utilizar transformadores de instrumento del tipo devanado, para interior o para exterior.

En este caso si se utilizará tanto transformadores de voltaje como transformadores de corriente puesto que la media tensión representa una condición insegura por el riesgo latente de que se produzca alguna descarga para el equipo como para el personal que eventualmente entre en contacto.

El voltaje al que se reduce el voltaje típicamente será 120 voltios y el valor de la corriente típicamente no será mayor a los 5 amperios. Los transformadores de instrumento se conectarán en sistemas trifásicos de tal manera que los medidores funcionen correctamente.

1.2.1.3. Medición en alta tensión

Por el riesgo que representa la alta tensión y lo que requeriría diseñar un transformador de instrumento lo suficientemente robusto como para que funcione con seguridad, no se utilizan transformadores de instrumento para altas tensiones. En su lugar se ha desarrollado el concepto de transformadores ópticos.

1.2.2. Protección

El transformador de instrumento utilizado para protección no requiere ser tan preciso como un transformador de instrumento utilizado para medición. El error en la precisión no debe exceder el 10 por ciento en los transformadores de instrumento.

Los transformadores de corriente utilizados para protección se clasifican en C o T. Cuando la clasificación es “C” la fuga de flujo magnético no tiene efecto notable en la relación de transformación. Cuando la clasificación es “T”

la fuga de flujo magnético tiene un efecto apreciable en la relación de transformación.

Según la norma ANSI, para los transformadores de instrumento usados en protección no existe un paralelogramo como para los transformadores de instrumento utilizados en medición. Sin embargo, deberán operar correctamente bajo condiciones de falla. En una condición de falla, la corriente fácilmente será del orden de 20 veces la corriente ordinaria.

El magnetismo remanente será un punto importante a tomar en cuenta con los transformadores de instrumento utilizados en protección debido a que al operar bajo condiciones de falla podrían llegar a un punto de saturación que claramente afecte su desempeño.

2. TRANSFORMADORES DE CORRIENTE DE RANGO EXTENDIDO

Para las empresas distribuidoras de energía eléctrica es muy importante la implementación de los transformadores de rango extendido debido a las ventajas que conllevan. Un ejemplo de ello se tiene en la IESO (siglas en inglés del Operador de Sistema Eléctrico Independiente), la cual tiene su sede en Canadá y que, a partir de la reunión del 2 de octubre de 2008 del Comité Permanente de Medición, se sugiere la obligatoriedad del uso de transformadores de instrumento de rango extendido (alta precisión). En la reunión de ese entonces se hablaba de un período de 1 año para la transición del uso de los transformadores de instrumento convencionales a los transformadores de instrumento de rango extendido.

2.1. Definición de transformador de corriente de rango extendido

Los transformadores de corriente de rango extendido son transformadores de corriente que mantienen su precisión en un rango muy amplio de corriente. Se definirá como transformador de corriente de rango extendido a aquel que tiene una precisión del 0,15 por ciento y que mantiene dicha precisión tanto con porcentajes bajos de su corriente nominal como con valores que exceden dicha corriente nominal.

Los transformadores de corriente de rango extendido garantizan la correcta medición en el rango del 5 por ciento al 100 por ciento según la norma, pero dependiendo del fabricante del equipo, dicho rango puede ser del 1 por ciento hasta el 100 por ciento y más, hasta alcanzar el valor del factor de

sobrecarga. Lo anterior los hace muy convenientes para ser usados por las compañías distribuidoras de energía eléctrica alrededor del mundo.

Además, según el factor térmico que defina el fabricante, los transformadores de instrumento de rango extendido pueden garantizar una precisión de 0,15 por ciento para valores superiores al nivel nominal para el que fueron construidos. Un transformador de instrumento cuyo factor térmico sea igual a 1,5 garantizará la correcta medición para el 150 por ciento de su capacidad nominal de conducción. Es decir, un transformador de instrumento de rango extendido que tenga por capacidad nominal 100 amperios y tenga un factor térmico igual a 1,5 podrá utilizarse en aplicaciones donde la corriente tenga valores que varíen desde 5 amperios hasta llegar a 150 amperios y no tener variación en su precisión.

Un lugar en donde se encuentra muy conveniente el uso de los transformadores de instrumento de rango extendido son las granjas de generadores eólicos y en puntos de intercambio en donde se compran y vendan bloques de energía, como por ejemplo, los grandes usuarios.

En las granjas de generadores eólicos se opera con cargas muy dispares debido a que la velocidad del viento aumenta y disminuye desde brisas ligeras hasta la capacidad plena. Al utilizar transformadores de instrumento de rango extendido, la exactitud aumenta y, por tanto, aumenta la rentabilidad.

Por ejemplo, en tiempos de zafra los ingenios pueden vender bloques de energía grandes y en tiempos en que no hay zafra compran energía. En los períodos que van desde el pico de la zafra hasta que esta acaba el consumo y venta de energía varía grandemente. Al usar transformadores de instrumento

de rango extendido se puede garantizar la exactitud en la medición cuando se vende y también cuando se compra energía.

Otra aplicación en la que es muy conveniente la utilización de los transformadores de instrumento de rango extendido son los puntos de intercambio. Por ejemplo, en generadoras en donde se compran bloques de energía menores y se venden bloques de energía mayores (cogeneración).

Los transformadores de instrumento de rango extendido pueden venir encapsulados en poliuretano, epóxico cicloalifático y también en epóxico hidrofóbico-cicloalifático.

Hablando de las características de los materiales para transformadores de instrumento se puede decir que el encapsulado en poliuretano es una alternativa eficaz y económica como aislante de equipos en media tensión. El material es muy fácil de fabricar, presenta propiedades aislantes muy buenas y un adecuado comportamiento en exteriores. Sin embargo, con el tiempo el material tiende a tener propiedades hidrofílicas, lo cual hace que con la lluvia presente una película continua sobre su superficie que permite recoger y disolver los contaminantes conductores transportados por el aire, tales como sales, ácidos orgánicos y ácidos inorgánicos. Tales películas electrolíticas llevan directamente a la formación de arcos.

Como el material es de naturaleza polímera, las temperaturas muy altas del arco degradan térmicamente el polímero y causan erosión en la superficie aislante, lo que lleva a su vez a un aumento de las fugas de corriente. Con el tiempo, las bandas secas se propagan y el consiguiente alargamiento del arco puede ocasionar descargas. El comportamiento en exteriores de estos equipos, de esta manera, puede verse seriamente comprometido.

Figura 12. **Transformador de corriente con encapsulado de poliuretano**



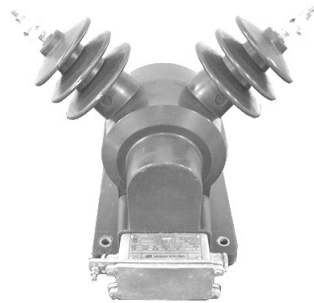
Fuente: *Type KOR-15C Current Transformer*. [http://www05.abb.com/global/scot/scot235.nsf/veritydisplay/685fc3f0605e72fc85256b1700587d79/\\$file/42-927_kor-15c_pur_nov2008.pdf](http://www05.abb.com/global/scot/scot235.nsf/veritydisplay/685fc3f0605e72fc85256b1700587d79/$file/42-927_kor-15c_pur_nov2008.pdf). Consulta: 21 de noviembre de 2011.

El encapsulado a base de epóxico cicloalifático presenta una resistencia muy buena a la degradación y a la erosión por descarga superficial y puede soportar la exposición a la humedad, la radiación ultravioleta, los contaminantes exteriores y los productos químicos. El material es el más empleado a escala mundial en equipos de media tensión debido a que, por no tener naturaleza polímera, no se ve comprometido su funcionamiento por alargamiento de los arcos de descarga. Es más pesado que el encapsulado a base de poliuretano. El epóxico cicloalifático es la mejor opción cuando se trata de encapsulado para aplicaciones en interiores.

El encapsulado a base de epóxico hidrofóbico cicloalifático (HCEP) es el mejor de los tres, combina la resistencia por alargamiento de los arcos de descarga del epóxico cicloalifático y la hidrofobicidad del poliuretano. Los materiales hidrofóbicos impiden que el agua forme una película en la superficie. Las gotitas de agua forman gotas más grandes que se deslizan por esas superficies, llevándose consigo los contaminantes conductores. Esa

característica de autolimpieza de las superficies hidrofóbicas reduce además la aparición de arcos prolongando aún más la vida de los equipos.

Figura 13. **Transformador de voltaje con encapsulado CEP**



Fuente: <http://www.alibaba.com/trade/search?SearchText=instrument+transformer&IndexArea=Products&fsb=y>. Consulta: 21 de noviembre de 2011.

El HCEP conserva la hidrofobicidad de la superficie aún después de una prolongada exposición a ambientes exteriores agresivos, al tiempo que mantiene sus excelentes propiedades eléctricas, químicas, térmicas y la resistencia a la erosión; propiedades características del material CEP. El HCEP se ha utilizado en los ferrocarriles franceses, sobre fuego y humo y en Sudáfrica en donde se tienen condiciones climáticas muy duras, está dentro de las más duras del mundo, debido a las radiaciones UV y los diversos contaminantes industriales y marinos.

2.1.1. Mejoras del núcleo del transformador de instrumento de rango extendido

El material con el que se fabrica el núcleo de los Transformadores de instrumento de Rango Extendido es una aleación de hierro nanocristalino en

donde se le ha agregado circonio para aumentar su dureza¹. El resultado es un material magnético suave, altamente permeable, que permite la medición mucho más precisa que el acero convencional para uso en equipo eléctrico.

Figura 14. **Transformador de corriente de rango extendido con encapsulado HCEP**



Fuente: *Instrument Transformer Basic Technical Information and Application*.

www.gedigitalenergy.com/products/brochures/ITtechInfo.pdf.

Consulta: 21 de noviembre de 2011.

Entre sus características, este material tiene una estabilidad térmica superior por lo que se puede utilizar a un rango más amplio de temperaturas, pueden operar continuamente en el rango que va de los -55 grados Celsius hasta los 130 grados Celsius. Tiene alta permeabilidad magnética y bajas pérdidas de energía, lo cual hace posible construir equipos menos pesados que sus predecesores. La dureza que le da el circonio sirve también para prevenir el desgaste prematuro que tenían las aleaciones de hierro nanocristalino que se habían desarrollado con anterioridad.

¹ Página de la Universidad Estatal de la Universidad de Carolina del Norte.
<http://news.ncsu.edu/2008/05/>. Consulta: 28 de marzo de 2011

2.2. Tipos de transformadores de rango extendido

Los transformadores de corriente de rango extendido son llamados transformadores de instrumento de alta precisión atendiendo a la forma de su comportamiento bajo carga. Se definen de esta manera dos tipos de transformadores de rango extendido, con clase de precisión 0,15 y con clase de precisión 0,15 superior.

2.2.1. Transformador de instrumento de rango extendido clase 0,15

Los transformadores de corriente con clase de precisión 0,15 son transformadores de corriente de rango extendido que tienen definidos dos límites de precisión, es decir, tienen dos precisiones. Tienen una precisión de 0,3 por ciento cuando por él circula el 5 por ciento de la corriente nominal y una precisión de 0,15 por ciento cuando por él circula la corriente nominal.

Tabla I. **Comportamiento de los transformadores de corriente con clase de precisión 0,15**

CORRIENTE					
	Menor a 5 por ciento	5 por ciento	5 por ciento a 100 por ciento	100 por ciento hasta RF	Mayor a RF
MÍNIMO	Indeterminado	0,9970	0,9970	0,9985	Indeterminado
MÁXIMO	Indeterminado	1,0030	1,0030	1,0015	Indeterminado

Fuente: elaboración propia, con datos de la Norma ANSI/IEEE C57.13.6.

Para el ejemplo en que se tiene un transformador de un transformador de corriente de rango extendido con capacidad nominal de 100 amperios y con una clase de precisión 0,15, se tiene una precisión de 0,3 por ciento cuando por él circula 5 amperios y una precisión de 0,15 por ciento cuando por él circula la corriente nominal de 100 amperios. Para ampliar el tema, en la figura 15 se puede observar su comportamiento.

2.2.2. Transformador de instrumento de rango extendido clase 0,15 superior

Los transformadores con clase de precisión 0,15 superior son transformadores de corriente de rango extendido que tienen definido únicamente un límite de precisión, es decir, tiene solamente una precisión. Tienen una precisión de 0,15 por ciento desde cuando por él circula una corriente equivalente al 5 por ciento de su corriente nominal y tiene la misma precisión cuando está funcionando al 100 por ciento de su corriente nominal. Su comportamiento se puede observar en la figura 16.

Tabla II. Comportamiento de los transformadores de corriente con clase de precisión 0,15 superior

	CORRIENTE				
	Menor a 5 por ciento	5 por ciento	5 por ciento a 100 por ciento	100 por ciento hasta RF	Mayor a RF
MÍNIMO	Indeterminado	0.9985	0.9985	0.9985	Indeterminado
MÁXIMO	Indeterminado	1.0015	1.0015	1.0015	Indeterminado

Fuente: elaboración propia, con datos de la Norma ANSI/IEEE C57.13.6.

Nuevamente, volviendo al ejemplo del transformador de instrumento con una corriente nominal de 100 amperios y con una clase de precisión 0,15 superior, se tiene que el transformador tiene una precisión de 0,15 por ciento desde que por el transformador circula una corriente de cinco amperios y mantiene la misma precisión al llegar a los 100 amperios. Para ampliar el tema, en la figura 15 se puede observar su comportamiento.

La siguiente tabla muestra el comportamiento de ambos transformadores de corriente de rango extendido:

Tabla III. **Comparación de los dos tipos de transformador de corriente de rango extendido**

	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo
Clase de precisión	0,15		0,15 superior	
A 5 por ciento de la corriente nominal	0,9970	1,0030	0,9985	1,0015
A 100 por ciento de la corriente nominal	0,9985	1,0015	0,9985	1,0015

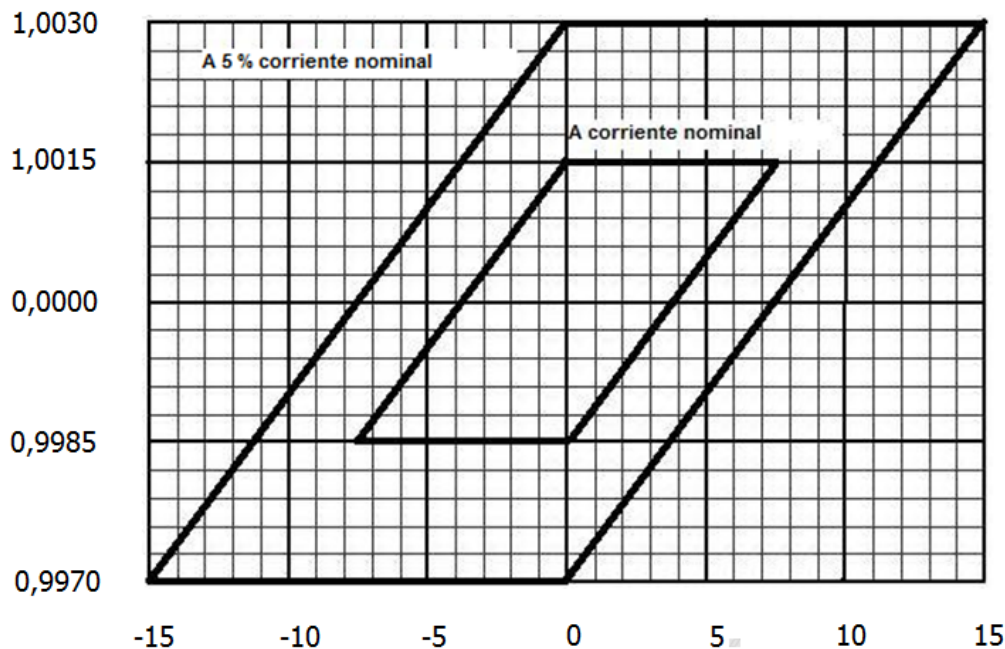
Fuente: elaboración propia, con datos de la norma ANSI/IEEE C57.13.6.

Habrá que hacer notar en este punto que existe fabricantes que exceden la norma y proveen al mercado de transformadores de instrumento de rango extendido cuyo umbral para empezar a cumplir con la exactitud de la precisión no es el 5 por ciento de la corriente nominal sino el 1 por ciento de la corriente nominal.

Para los transformadores de voltaje de rango extendido, estos deberán funcionar correctamente desde el 90 por ciento del voltaje nominal hasta 100

por ciento el valor del mismo². Mientras que para los transformadores de voltaje tradicionales, su funcionamiento deberá ser correcto en el intervalo que va desde el 90 por ciento hasta el 110 por ciento³.

Figura 15. **Diagrama del paralelogramo de transformador de corriente con clase de precisión 0,15**



Fuente: elaboración propia, con datos de la Norma ANSI/IEEE C57.13.6

2.3. Diagrama del paralelogramo

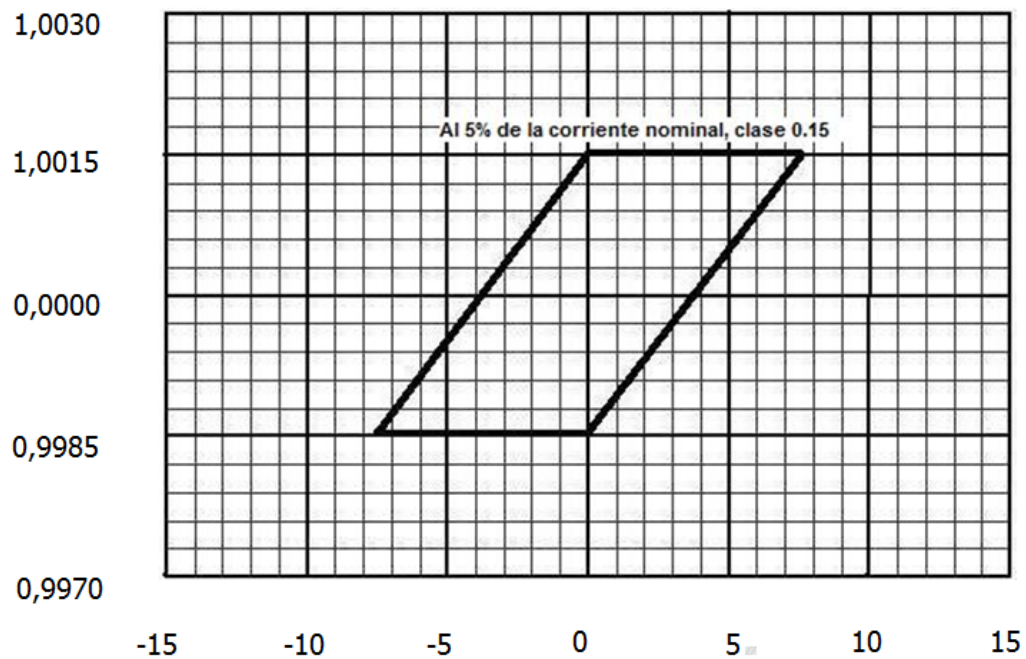
Como se verá, el diagrama del paralelogramo para cada uno de los tipos de transformador de instrumento de rango extendido es distinto. En el diagrama del transformador con clase de precisión 0,15 se tiene dos diagramas con forma de paralelogramo. Uno de ellos, el más grande, es el paralelogramo

² Extraído de la norma ANSI/IEEE C57.13.6 punto 4, nota de la figura 3

³ Extraído de la norma ANSI/IEEE C57.13 punto 5.4, nota de la figura 3

dentro del cual se describe el comportamiento del transformador de corriente de rango extendido cuando funciona a 5 por ciento de su capacidad nominal. El más pequeño describe su comportamiento bajo condiciones de 100 por ciento de la corriente nominal.

Figura 16. **Diagrama del paralelogramo de transformador de corriente con clase de precisión 0,15 superior**



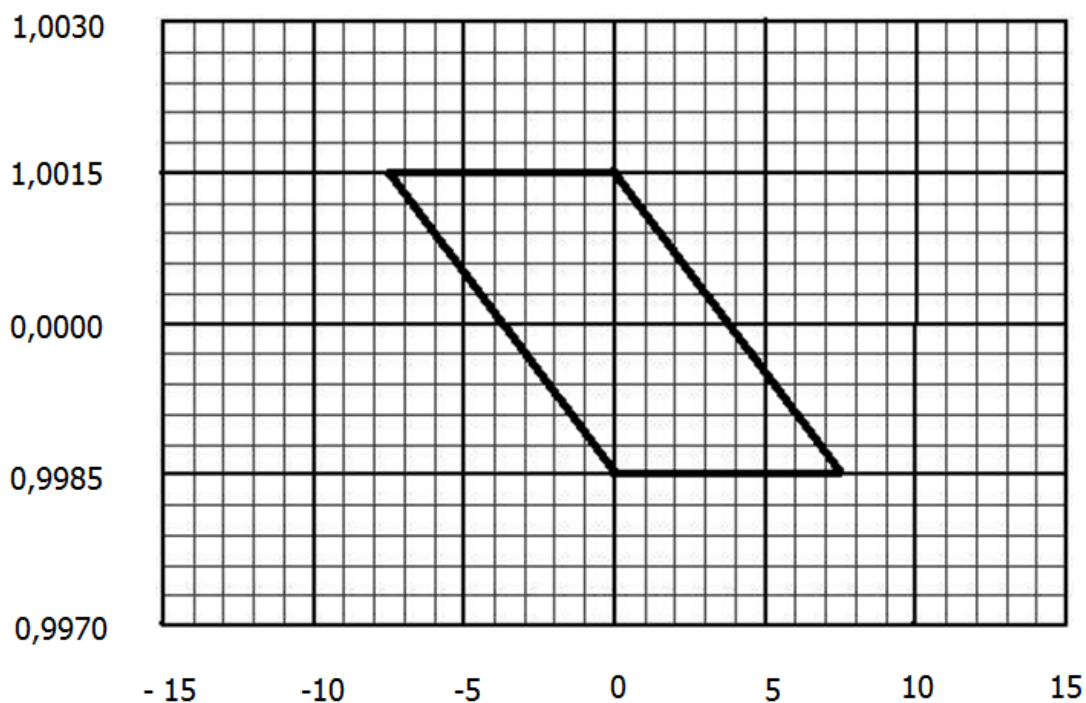
Fuente: elaboración propia, con datos de la norma ANSI/IEEE C57.13.6.

Tal como puede observarse en la figura 15, la magnitud de la desviación a corriente nominal es menor que la desviación al 5 por ciento de ella; cuando el transformador de corriente funciona al 5 por ciento de su capacidad nominal, la exactitud en esas condiciones es de 0,3 por ciento y el transformador opera en el paralelogramo clase 0,3 por ciento pero, cuando funciona al 100 por ciento

de su corriente nominal, el transformador de corriente opera en el paralelogramo de clase 0,15 y su exactitud es de 0,15 por ciento.

Por el contrario, para describir el comportamiento del transformador de corriente de rango extendido clase de precisión 0,15 superior por medio de un paralelogramo, se necesita no más que uno ya que la precisión no varía desde el 5 por ciento hasta el valor de corriente que quede definido por la capacidad térmica del mismo a una temperatura dada.

Figura 17. **Diagrama del paralelogramo de transformador de voltaje con clase de precisión 0,15**



Fuente: elaboración propia, con datos de la Norma ANSI/IEEE C57.13.6.

El diagrama del paralelogramo para el transformador de voltaje de rango extendido también se compone únicamente de un paralelogramo en el que se observa su comportamiento.

Para que se cumpla con las especificaciones de los transformadores de instrumento de rango extendido es importante que se cumpla con el *burden* específico para el cual se han diseñado. Para una frecuencia de 60 hertzios se tienen dos *burden* normalizados de tal manera que se pueda utilizar medidores de energía eléctrica (comúnmente llamados contadores) de estado sólido, es decir medidores electrónicos. Cabe hacer notar que los grandes fabricantes de medidores de energía ya no están produciendo equipo electromecánico, en su lugar se produce medidores electrónicos que son mucho más exactos y más precisos con menor *burden*.

Los *burden* normalizados son los siguientes que se presentan en la tabla IV.

Tabla IV. ***Burden* normalizado para transformadores de corriente con 5 amperios en el secundario funcionando a 60 hertzios**

Designación del <i>burden</i>	E-0,2	E-0,04
Resistencia (ohmios)	0,2	0,04
Inductancia (milihenrios)	0,0	0,00
Impedancia (ohmios)	0,2	0,04
Potencia total (a 5 amperios)	5,0	1,00
Factor de potencia	1,0	1,00

Fuente: elaboración propia, con datos de la Norma ANSI/IEEE C57.13.6.

2.4. Comportamiento del transformador de corriente de rango extendido con cargas fluctuantes

El comportamiento del transformador de corriente de rango extendido, como todo transformador de instrumento, es afectado por las cargas fluctuantes además del *burden*. Es por ello que los fabricantes deben hacer varias pruebas a los transformadores de instrumento antes de salir de la fábrica.

Para un transformador de corriente de rango extendido las pruebas, deberán hacerse en 4 puntos de funcionamiento. En los 4 puntos el comportamiento del transformador de corriente de rango extendido, deberá circunscribirse al paralelogramo que define su comportamiento. En la tabla V se observa los 4 puntos indicados.

Tabla V. **Puntos de prueba para transformadores de instrumento de rango extendido**

Punto de prueba	1	2	3	4
Corriente de prueba	100 por ciento	5 por ciento	100 por ciento	5 por ciento
<i>Burden</i> de prueba	E-0,04	Máximo <i>burden</i> de diseño	Máximo <i>burden</i> de diseño	E-0,04

Fuente: elaboración propia, con datos de la Norma ANSI/IEEE C57.13.6.

Para los transformadores de voltaje de rango extendido solamente hay dos puntos de prueba, uno será con *burden* cero y el otro con el máximo *burden* para el que fueron diseñados. En los dos puntos el voltaje será del 100 por ciento para el que se diseñaron. Los resultados de esta prueba deberán

también quedar circunscritos en el paralelogramo que define su comportamiento.

Si como ejemplo 2.1 se supone que, se tiene un transformador de corriente de rango extendido con una clase de precisión 0,15 superior, del cual, se tiene sospechas de su correcto funcionamiento. Se hacen pruebas y los resultados en los cuatro puntos de prueba fueron:

- Punto 1: 1,0005 y -4,0 minutos
- Punto 2: 0,9986 y 5,0 minutos
- Punto 3: 1,0010 y 3,0 minutos
- Punto 4: 1,0000 y 5,0 minutos

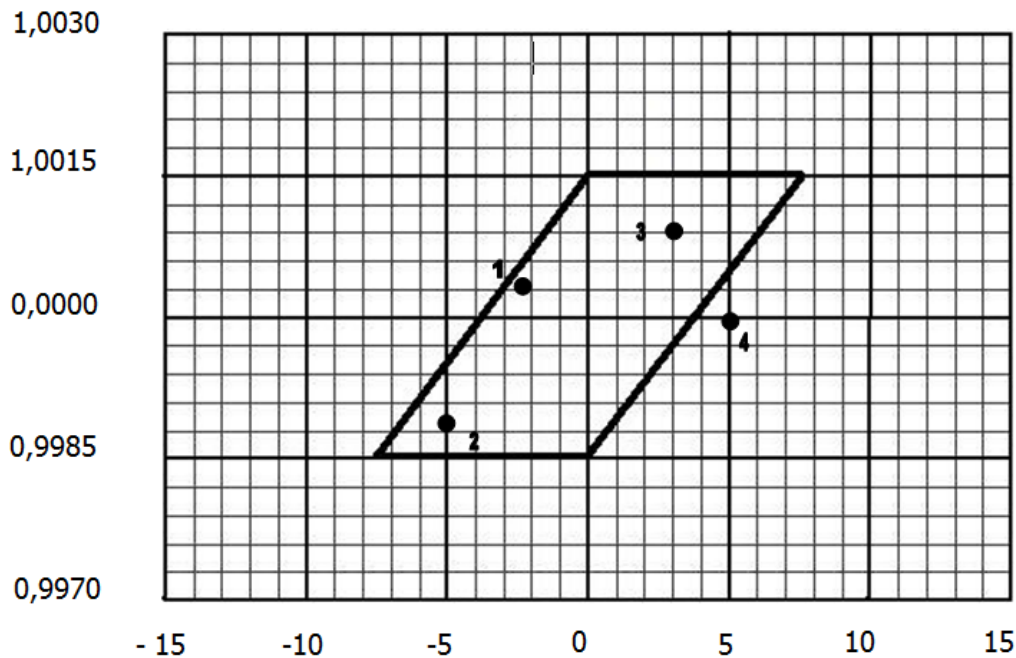
Si los 4 puntos se ubican dentro del paralelogramo se tendría lo que se observa en la figura 18.

Como puede observarse el punto 4 no está circunscrito dentro del paralelogramo por lo que, de encontrarse un transformador de instrumento de rango extendido con dicha característica, se deberá desechar por no cumplir con el diseño de acuerdo a la norma ANSI/IEEE C.57.13. A simple vista se observa que se tiene una precisión mayor puesto que la prueba dio como resultado 1,0000 es decir, 100 por ciento; sin embargo, el desfase es mayor al permitido.

Incluso pudiera pensarse que el punto 2 debiera rechazarse también por tener el mismo desfase que el punto 4; pero, si se piensa en la manera en que afecta el desfase entre los ángulos de voltaje y corriente al valor de la potencia real se comprenderá que de la misma manera un ángulo de desfase mayor

producirá como efecto una medición menos exacta y por tanto, se tendrán pérdidas.

Figura 18. **Gráfica de los puntos 1 a 4 del ejemplo 2.1**



Fuente: elaboración propia, con datos de la Norma ANSI/IEEE C57.13.6.

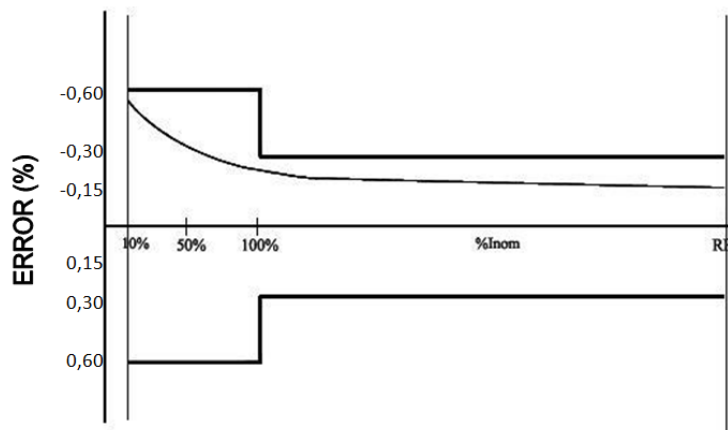
Otra manera en que puede observarse el comportamiento entre los transformadores de instrumento es por medio de una figura en donde se observe el comportamiento del error en la medición contra la corriente o voltaje, que circulen por el transformador de instrumento.

El diagrama del paralelogramo que se ha estado presentando es el que comúnmente se utiliza en la normativa ANSI/IEEE mientras que el diagrama del túnel, que se obtiene con graficar el comportamiento del transformador de instrumento contra la corriente o el voltaje, según sea el caso, es utilizado por la

normativa IEC (por las siglas en idioma inglés de la Comisión Electrotécnica Internacional).

Al comparar las figuras 19 y 20, en las que se ha graficado el error contra el valor de la corriente, para un transformador de corriente clase 0,3 y para un transformador de corriente clase 0,15 respectivamente, se podrá observar nuevamente la diferencia entre el comportamiento entre los transformadores de instrumento tradicionales y los transformadores de instrumento de rango extendido.

Figura 19. **Gráfica del túnel para un transformador clase 0,3**

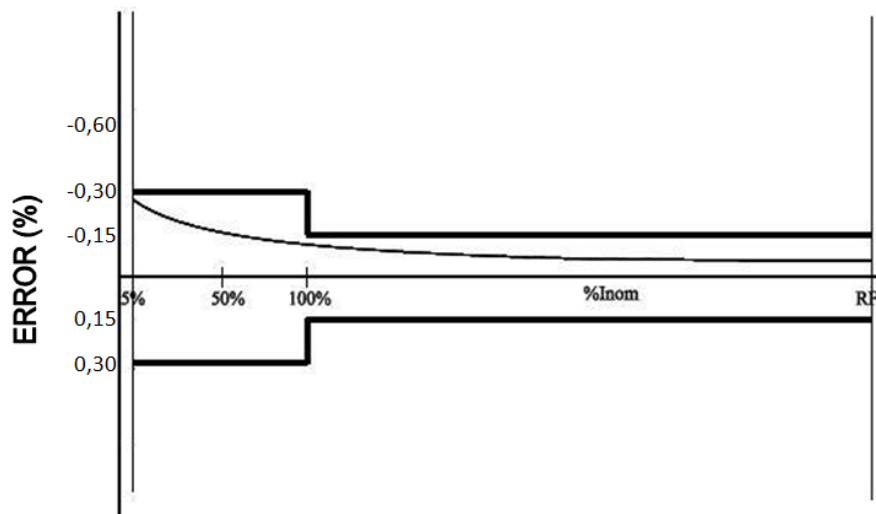


Fuente: *Applying 600V High-Accuracy Current Transformers for Revenue Metering Applications*.
Boletín técnico 103. www.ritzusa.com/Resources/45.pdf. Consulta: 21 de marzo de 2011.

En las figuras 19 y 20 se puede observar claramente el comportamiento del transformador de instrumento en 4 regiones, la primera antes de llegar al umbral, cuyo valor depende de la clase de precisión de la cual sean, la segunda que va desde la precisión desde el umbral hasta el 100 por ciento de la corriente nominal, la tercera que va desde el 100 por ciento de la corriente

nominal hasta el valor de RF y la cuarta a partir del valor del RF. Vale la pena indicar acá que, si bien figuras similares a las anteriores son usadas por la IEC, lo que se ha graficado en ellas son transformadores con clase de precisión 0,3 y 0,15 que están presentes en las normas IEEE.

Figura 20. **Gráfica del túnel para un transformador clase 0,15.**



Fuente: *Applying 600V High-Accuracy Current Transformers for Revenue Metering Applications*.
Boletín técnico 103. www.ritzusa.com/Resources/45.pdf. Consulta: 21 de marzo de 2011.

3. NORMATIVA QUE REGULA LOS TRANSFORMADORES DE RANGO EXTENDIDO

La normativa que regula los transformadores de rango extendido es una consecuencia del uso de los transformadores. La norma ANSI que regula todo lo concerniente a los transformadores es la norma ANSI/IEEE C57. Dicha norma aglutina varias familias de normas que regulan aspectos específicos, de tal forma que, se tiene una familia de normas para los transformadores de distribución, una para los transformadores de instrumento, etc.

De igual manera, la normativa IEC que regula los transformadores de instrumento es la IEC 60044. La primera parte, es decir, la norma IEC 60044-1 versa acerca de los transformadores de corriente y la norma IEC 60044-2 norma acerca de los tranformadores de voltaje inductivos.

Si bien las dos normativas regulan lo concerniente a los transformadores de instrumento, la normativa que regula específicamente a los transformadores de instrumento de rango extendido es la normativa ANSI/IEEE, por tanto, se considerará únicamente dicha normativa.

3.1. Historia de los transformadores de rango extendido

En los Estados Unidos de Norte América se inicia una nueva legislación de eficiencia en 2 005. La nueva legislación de eficiencia es publicada en 2007 y tiene como compromiso en ese país mejorar la eficiencia del uso de la energía ya sea esta energía eléctrica, energía producida por vapor, energía derivada de

la quema de combustible fósil u otras, además, intenta aumentar el uso de energías renovables.

Dos leyes federales, una concerniente a la electricidad y eficiencia energética y otra concerniente a la independencia energética y ley de seguridad. Ambas fueron publicadas en enero de 2007 y en ambas se expresa la necesidad de mejorar la eficiencia en el uso de la energía y de aumentar el uso de energías renovable. Dichas leyes federales afectan tanto a la industria de electricidad, de gas natural y petróleo, entre otras, como también a las empresas distribuidoras de energía y a los consumidores de energía eléctrica, eso incluye la fabricación de automóviles y otros.

- La primera de ellas, concerniente a la independencia energética y seguridad, tiene dentro de sus títulos los siguientes:
 - Seguridad energética a través de la mejora en la economía de los vehículos
 - Seguridad energética a través del aumento en la producción de biocombustibles
 - Ahorro de energía a través de del mejoramiento de los estándares para electrodomésticos e iluminación
 - Ahorro de energía en edificios e industria
 - Ahorro de energía en el gobierno e instituciones públicas

- Investigación y desarrollo acelerados en el aprovechamiento de la energía solar, geotérmica, hidráulica, hidráulica marítima y almacenamiento de energía para transporte y energía eléctrica
- Captura y secuestro de carbón
- Mejora de la gestión de la política energética
- Programas internacionales de energía
- Trabajos verdes
- Transporte de energía e infraestructura
- Programas energéticos para la pequeña industria
- Red inteligente
- Seguridad en piscinas y spas
- Disposiciones de los ingresos
- Fecha en que se hace efectivo

Como se observa, son muchos los puntos que toca esta legislación; sin embargo, en lo que respecta a los transformadores de instrumento, el título que atañe directamente es el título XIII, concerniente a la red inteligente.

En una red tradicional las empresas distribuidoras de energía son capaces de hacer llegar energía eléctrica en la cantidad que requiera el usuario en cualquier momento, siempre y cuando se cuente técnicamente con lo necesario (cables, elementos de protección, etc.), tanto si dicha energía la necesita el usuario no la necesita. Otra característica que tienen dichas redes es que tienen una sola dirección, los consumidores son receptores pasivos que no pueden figurar como posibles productores de electricidad domésticos.

Por el contrario, en una red inteligente de energía eléctrica cada usuario puede figurar como productor de electricidad, tomar una parte para autoconsumo y el resto inyectarlo a la red, es más, propicia el uso de energía renovable dentro de la red ya que por lo general la energía utilizada para el autoconsumo es la energía solar o bien pequeñas turbinas accionadas por el viento.

Un problema que actualmente se tiene en las redes tradicionales de energía es que la energía renovable es muy difícil de planificar, anticipar cuanta cantidad de sol o de viento habrá es duro y lo que es más, en algunos lugares en donde se tiene más recursos renovables de este tipo no hay consumidores que pudieran utilizar dicho recurso para generar electricidad. Un ejemplo claro de esto se tiene en el desierto del Sahara; allí hay mucha energía solar que podría utilizarse perfectamente, sin embargo, los posibles consumidores de dicha energía están muy lejos para aprovecharla.

Lo primero que se necesita para la utilización de las redes inteligentes de energía eléctrica es tener medidores de energía inteligentes que midan el consumo de cada aplicación conectada a la red y que transmitan dichas mediciones a la empresa suministradora de energía eléctrica. Es decir, se necesita un medidor que esté conectado en tiempo real con la empresa

distribuidora de energía eléctrica enviándole datos acerca de cuando el usuario toma energía de la red y cuando el usuario está inyectando energía a la red. Tal como puede observarse de necesita un medidor de energía eléctrica que funcione en ambas vías y eso solo se logra con la utilización de medidores electrónicos.

La red inteligente trae varias ventajas para los usuarios ya que, al contar con un medidor inteligente, se podría obtener una facturación más detallada y por tanto, aprovechar a utilizar la mayor cantidad de energía eléctrica cuando ésta es más barata. El usuario, además, podría adquirir electrodomésticos inteligentes que se activen cuando la energía es más barata. Por parte de la distribuidora también habría ventajas puesto que los valores picos de demanda al sistema bajarían debido al autoconsumo de los usuarios.

En nuestro medio no es costumbre que se haga una facturación dependiendo de la hora en que se consume la energía eléctrica, a excepción de los grandes usuarios de energía por lo que esto puede ser una oportunidad que se explote en el futuro.

En el contexto de las redes inteligentes de energía eléctrica, se observa la necesidad del uso de transformadores de instrumento capaces de conectarse a los medidores electrónicos inteligentes y que se obtenga de ellos una medición más precisa.

Los medidores electrónicos o de estado sólido tienen la particularidad de que el *burden* que constituyen es menor al *burden* que constituyen los medidores comunes llamados electromecánicos. Como se vio con anterioridad, la precisión de un transformador de instrumento depende del *burden* que se conecte a él, por tanto, con la nueva legislación se observó la necesidad de

contar con otros transformadores de instrumento. Tales transformadores de instrumento son los transformadores de instrumento de rango extendido.

La legislación concerniente a la independiencia energética y seguridad en su sección 1 301 establece la política federal para modernizar la transmisión de electricidad y los sistemas de distribución para mantener la fiabilidad y protección de su infraestructura. Se refiere a las redes inteligentes como aquellas en las que se tiene un sistema de distribución que permite el flujo de información de los medidores en dos direcciones, tanto hacia el interior de los hogares como hacia la red de distribución, incluye medidores inteligentes, electrodomésticos inteligentes, los recursos de energía renovable y eficiencia energética.

La segunda de ellas, concerniente a la eficiencia energética, trata acerca de los transformadores de energía eléctrica, los congeladores, los refrigeradores, las lámparas eléctricas, aires acondicionados y otros.

En ella ya se hace referencia a aspectos más prácticos de cómo se deberá instalar y gestionar las redes inteligentes. Para el estado de *Connecticut* se tiene por ejemplo:

- Sección 98, literal a: cada empresa de distribución eléctrica deberá presentar un plan al Departamento de Control de Servicios Públicos para implementar un sistema de medición avanzada. En lugar de presentar un plan de aplicación de la presente sección, una compañía de distribución eléctrica puede solicitar una determinación por parte del departamento de que el sistema de medición la compañía cumple con los requisitos de esta sección. Estos sistemas de medición apoyarán la medición neta y debe ser capaz de seguir el consumo por hora del cliente, así como

también lo que el cliente inyecta a la red, de tal manera que se puedan considerar los precios hora del día o en tiempo real del servicio eléctrico para todas las clases de clientes de cara a la facturación.

- Sección 98 literal c: el costo del sistema de medición avanzada, incluyendo pero no limitado a, los medidores, la red para apoyar el uso de los medidores, el software y el costo por obtener la información necesaria del sistema de medición, gastos administrativos, instalación, costos de operación y de mantenimiento, correrán a cargo de la empresa de distribución eléctrica y se podrá recuperar en las tarifas. Todos los gastos no recuperados del sistema de medición de corriente se seguirán reflejándose en las tarifas.
- Sección 39: si en un período de facturación determinado, por ejemplo un mes, la electricidad generada por el cliente-generador es superior a la energía suministrada a él por la compañía distribuidora, la energía distribuidora procederá a aplicar un crédito en la siguiente factura del cliente-generador para compensar dicha diferencia. Los créditos generados de esta manera son acumulables a través del período anual, luego del cual, de existir todavía algún crédito, la compañía distribuidora procederá a compensar el exceso de generación del cliente-generador.

Como se observa, en las legislaciones anteriores, las redes inteligentes dan paso a la implementación de los transformadores de instrumento de rango extendido.

3.2. Creación de los transformadores de rango extendido

Como se vio en el apartado anterior, de la normativa tendiente a la utilización de las redes inteligentes se tiene la necesidad de utilizar transformadores de instrumento que tengan alta precisión y que necesiten un *burden* de menor tamaño al que utilizan los transformadores de instrumento tradicionales.

Los transformadores de instrumento nacen de esta manera con la nueva legislación desde el 2 005. La normativa que regula los transformadores de instrumento de rango extendido se empezó a trabajar casi en paralelo con la nueva legislación, de tal forma que el Comité de Transformadores de la IEEE *Power Engineering Society* (Sociedad de Ingeniería de Potencia del Instituto de Ingenieros Electricistas y en Electrónica) aprobó en septiembre de 2 005 la normativa respectiva.

Por parte del Instituto Nacional Norteamericano de Estándares (ANSI) la aprobación de la misma normativa aprobada por la IEEE se efectuó en diciembre de 2 005. La normativa en si misma contempla principalmente 3 aspectos:

- La creación de dos nuevas clases de precisión
- La creación de *burden* adecuados para medidores de estado sólido, es decir, digitales
- La creación de una nueva manera de hacer la verificación de rutina en fábrica para este tipo de transformador de instrumento

La publicación de la normativa para los nuevos transformadores de instrumento se hizo hasta diciembre de 2 005. Los siguientes dos apartados de este capítulo tratan directamente dicha normativa y la normativa de los transformadores de instrumento en general.

3.3. Normativa ANSI que regula los transformadores de rango extendido

Como todo dispositivo desarrollado por el hombre, los transformadores de instrumento son regulados por ciertas normativas para que no se fabriquen máquinas y dispositivos de utilización única. En el caso de los dispositivos eléctricos es aún más importante la estandarización porque generalmente los distintos dispositivos son conectados a redes y a sistemas con valores específicos, tales como voltaje y frecuencia. En consecuencia, se desarrolla cierta normativa para que los distintos artefactos puedan conectarse a dichos sistemas.

Toda normativa se revisa constantemente en busca de imperfecciones, ambigüedades y nuevos descubrimientos o desarrollos concernientes a la misma. Las normas como tal, son documentos de carácter técnico y legal, elaboradas por consenso entre las partes interesadas como puede ser el gobierno, fabricantes, etc.

Anteriormente las normas tenían un carácter regional, es decir, en cada país había un ente regulador que emitía las normas. Dicho ente regulador era integrado siempre por partes interesadas, pero para ser aplicadas en un ámbito meramente nacional. En la actualidad, debido al comercio electrónico y a la internacionalización de los bienes de capital y mercados, las normas tienden a unificarse en normas internacionales de tal cuenta que elementos construidos

independientemente en varios países puedan utilizarse en cualquier país del mundo.

Por el carácter internacional que representa la normativa de la IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineers* por sus siglas en idioma inglés) o Instituto de Ingenieros Electricistas y Electrónicos en idioma castellano, se toma dicha normativa como referencia. Dicha normativa indica la manera en que deben ser diseñados los distintos transformadores de instrumento. Como se mencionó anteriormente, toda norma evoluciona con el tiempo y la normativa que regula a los transformadores de instrumento también lo ha hecho, al punto que ha dado la pauta para que también se normalice la construcción de los transformadores de instrumento de rango extendido.

También se hace necesario hacer notar que la normativa de la IEEE concerniente a los transformadores de instrumento es elaborada conjuntamente con la ANSI (*American National Standards Institute*) o Instituto Estadounidense de Estándares. La norma específica que regula los transformadores de instrumento es la norma ANSI/IEEE C57.13. Dicha norma se ha revisado varias veces desde su concepción en 1954. Forma parte de una familia de normas concernientes a la fabricación de transformadores llamada ANSI/IEEE C57, las cuales se dieron a conocer formalmente en 1942. Para determinar el año de cada una de la norma, al final suele estar el año en que se publicaron, por ejemplo, la ANSI/IEEE C57 1 978 es la versión de 1 978 de la ANSI/IEEE C57.

La normativa correspondiente a los transformadores de instrumento de rango extendido hace su aparición en 2 005 dentro de la C57.13 2 005 constituyéndose como la norma C57.13.6 2 005.

3.3.1. ANSI/IEEE C57.13 1 987

La normativa ANSI/IEEE C57.13 DE 1 987 es una reafirmación de la norma de C57.13 1 978, la cual es una revisión de la norma C57.13 1 968. A continuación se desarrolla una descripción sucinta de dicha norma.

En cuanto a los requerimientos generales de funcionamiento de los transformadores de instrumento se indicaba que la temperatura usual sería de 30 grados Celsius para los devanados, era esta también la temperatura ambiente usual y que la operación se haría a una altura no superior a los 1 000 metros sobre el nivel del mar, se consideraba como máxima una temperatura de 55 grados Celsius para cuando los transformadores estaban en interior y una para temperaturas y alturas inusuales se contaba con una tabla para la corrección de la rigidez dieléctrica.

La frecuencia para la cual estaban diseñados los transformadores de instrumento era de 60 hertzios. Se indicaba el nivel básico de aislamiento requerido, así como también las pruebas mínimas que como rutina debía hacerse. Las marcas de polaridad debían estar claramente marcadas utilizando marcas permanentes, cosa que todavía se tiene, y se indicaba la denominación para cada uno de los terminales.

Las clases de precisión estándar eran 0,3, 0,6 y 1,2; dichas precisiones describían el comportamiento de los transformadores de instrumento mientras funcionaban como mínimo al 90 por ciento de la carga y hasta el 100 por ciento, es decir, carga completa. Para el intervalo comprendido del 10 por ciento hasta antes del 90 por ciento los mismos transformadores de instrumento, de las mismas presiones veían duplicados sus valores, es decir, un transformador de corriente de precisión 0,3 tenía típicamente una variación desde 0,9970 a

1,0030 en su precisión cuando funcionaba del 90 por ciento al 100 por ciento de la carga, pero, desde 10 por ciento de la carga, hasta antes del 90 por ciento de la carga, el mismo transformador de corriente tenía típicamente una variación que oscilaba entre el 0,994 hasta 1,006.

Con respecto al *burden*, se indicaba siempre que era para 5 amperios de corriente en el lado secundario y podía tener varios valores. El factor térmico también podía tomar ciertos valores, siendo el mayor 4,0. Otros valores importantes como las corrientes de corta duración para los transformadores de corriente, corriente de cortocircuito, etc., también se indicaban. Por último, también indicaba los datos que como mínimo debían consignarse en la placa de características.

Para los transformadores de voltaje específicamente se indicaba el tipo de conexiones que podían hacerse con ellos y la forma de hacerlos. Por último se indicaba los métodos a utilizar para hacer las distintas pruebas, tales como la prueba de desmagnetización.

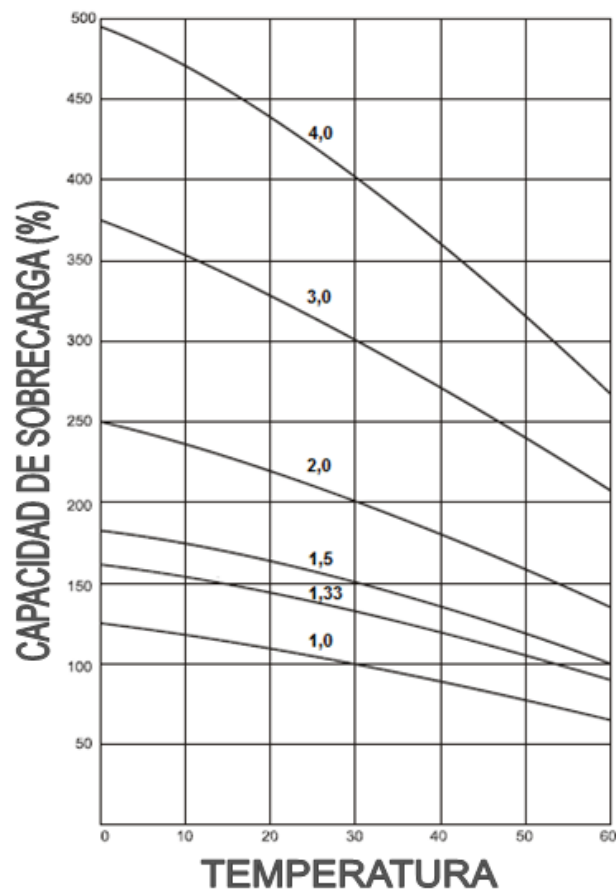
3.3.2. ANSI/IEEE C57.13 2 005

La versión de 2 005 de las normas ANSI/IEEE C57.13, es decir, la ANSI/IEEE C77.13 2 005 contempla, además de las normativa para los transformadores de instrumento tradicionales, la creación de una nueva norma de la familia, la ANSI/IEEE C57.13.6 2 005 que es la primera normativa para los transformadores de instrumento de rango extendido. La ANSI/IEEE C57.13.6 2 005 se reafirmó en 2 010.

En la ANSI/IEEE C57.13 se indica que el propósito de la norma es proveer los requerimientos de desempeño para el sistema eléctrico y proporcionar

intercambiabilidad para los transformadores de voltaje y corriente cuyo principio de funcionamiento es la inducción y cuya construcción sea para interiores o para exteriores.

Figura 21. **Características de comportamiento de los transformadores de corriente con la temperatura**



Fuente: norma ANSI/IEEE C57.13.

Dentro de las condiciones de servicio se establece, al igual que en la versión de 1 987, que la altura sobre el nivel del mar debe ser inferior a los mil metros sobre el nivel del mar y la temperatura promedio del ambiente no debe

sobrepasar los 30 grados Celsius, indica también que la temperatura no debe ser superior a los 40 grados Celsius. Lo anterior no significa que no se pueden utilizar los transformadores de instrumento a temperaturas superiores o a alturas mayores, lo que significa es que se deberá tener en cuenta que el desempeño de tales dispositivos no será el mismo y de esa cuenta proporciona gráficas y tablas para hacer ajustes.

Figura 22. Características de comportamiento de los transformadores de corriente con la temperatura

Altitud en metros sobre el nivel del mar	Factor de corrección para resistencia dieléctrica
1 000	1,00
1 200	0,98
1 500	0,95
1 800	0,92
2 100	0,89
2 400	0,86
2 700	0,83
3 000	0,80
3 600	0,75
4 200	0,70
4 500 (máximo)	0,67

Fuente: norma ANSI/IEEE C57.13.

Con respecto a la temperatura, indica valores a utilizar para cuando la temperatura ambiente es de 55 grados Celsius en promedio, con un valor máximo para la temperatura ambiente de 60 grados Celsius. Es más, para los transformadores de corriente se tiene una gráfica en donde se observa el efecto

de la temperatura para distintos factores de sobrecarga. En dicha gráfica se observa una familia de curvas, cada curva representa el comportamiento esperado para un valor de factor de sobrecarga, es decir, se tiene una curva para el factor de sobrecarga 4,0, otra para el factor de sobrecarga 2,0, etc.

Las curvas se basan en la asunción de que el promedio de la temperatura varía con el cuadrado del valor de la corriente que circule por el transformador de corriente.

Con respecto al efecto de la altura, el factor crítico es el efecto que la variación de la densidad del aire deviene en la variación del voltaje necesario para que aparezcan las descargas parciales en la superficie del aislador. Se considera como máxima una altura de 4 500 metros sobre el nivel del mar.

La frecuencia de funcionamiento para la que se diseñan los transformadores de instrumento es 60 hertzios.

Con respecto a la clase de precisión, se establece 3 tipos: clase de precisión 0,3, 0,6 y 1,2. Se tiene transformadores de corriente y transformadores de voltaje con cada una de las clases de precisión descritas.

Tabla VI. **Comparación de las tres clases de precisión para transformadores de corriente**

	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.
Clase de precisión	0,3		0,6		1,2	
A 10 por ciento de la corriente nominal	0,9940	1,0060	0,9880	1,0120	0,9760	1,0240
A 100 por ciento de la corriente nominal	0,9970	1,0030	0,9940	1,0060	0,9880	1,0120

Fuente: elaboración propia, con datos de la Norma ANSI/IEEE C57.13.

En el caso de los transformadores de corriente, la clase de precisión efectiva variará con la carga. Es decir, los transformadores de corriente no se comportarán de la misma manera bajo condiciones fluctuantes de carga. La precisión real será la precisión efectiva solamente cuando la corriente sea exactamente la corriente para la cual se diseñó, o sea, la corriente nominal. La siguiente figura presenta una tabla en donde se observa dicho comportamiento.

Con respecto al ángulo de desfase que se presenta en el lado secundario de los transformadores de corriente, expresado en minutos, éste también varía con la carga y no es el mismo para todas las clases de precisiones. Conforme la clase de precisión tiene un valor más alto, la holgura para el ángulo también tiene un valor más alto. La siguiente figura muestra una tabla en donde se observa esto.

Tabla VII. **Comparación del ángulo de las tres clases de precisión para transformadores de corriente**

	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.
Clase de precisión	0,3		0,6		1,2	
A 10 por ciento de la corriente nominal	-30	30	-60	60	-120	120
A 100 por ciento de la corriente nominal	-15	15	-30	30	-60	60

Fuente: elaboración propia, con datos de la Norma ANSI/IEEE C57.13.

Como se puede inferir de los datos de las dos tablas anteriores, para explicar el comportamiento de cada clase de precisión se necesita de dos paralelogramos distintos. Y por otra parte, para una clase de precisión dada, el comportamiento al 10 por ciento de la corriente nominal de la clase de precisión es igual al comportamiento al 100 por ciento de la clase de precisión inmediata

superior. Por ejemplo, el comportamiento que presenta la clase de precisión 0,6 funcionando a 10 por ciento de la corriente nominal es igual al comportamiento de la clase 1,2 funcionando a 100 por ciento de la corriente nominal.

Para los transformadores de voltaje utilizados en medición también se puede hacer una comparación para las distintas clases de precisión. Por la operación característica de los transformadores de voltaje, conectados a voltajes de sistema que son estables, no es necesario definir su comportamiento para algún porcentaje de su valor nominal. En lugar de ello, se establece solamente valores máximos y mínimos para el intervalo que va desde el 90 por ciento de su valor nominal al 110 por ciento de su valor nominal que, básicamente, es el mismo.

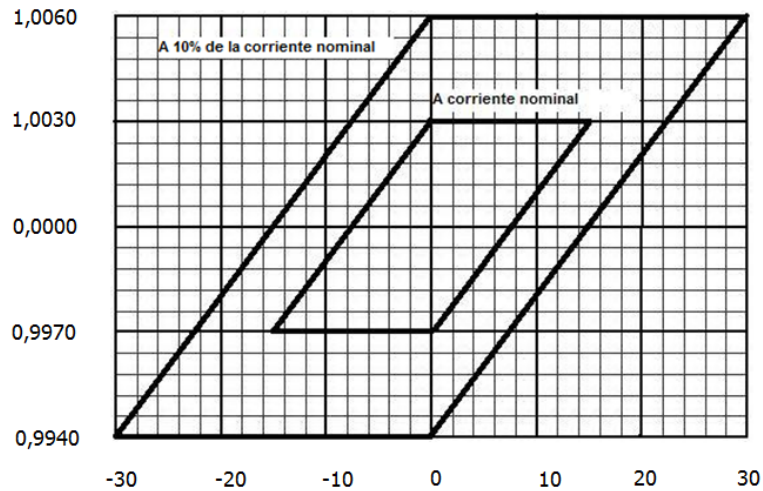
Tabla VIII. **Comparación del comportamiento de las diferentes clases de precisión de transformadores de voltaje**

	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.
Clase de precisión	0,3		0,6		1,2	
Variación de la precisión	0,9970	1,0030	0,9940	1,0060	0,9880	1,0120
Variación del ángulo	-30	30	-60	60	-120	120

Fuente: elaboración propia, con datos de la Norma ANSI/IEEE C57.13.

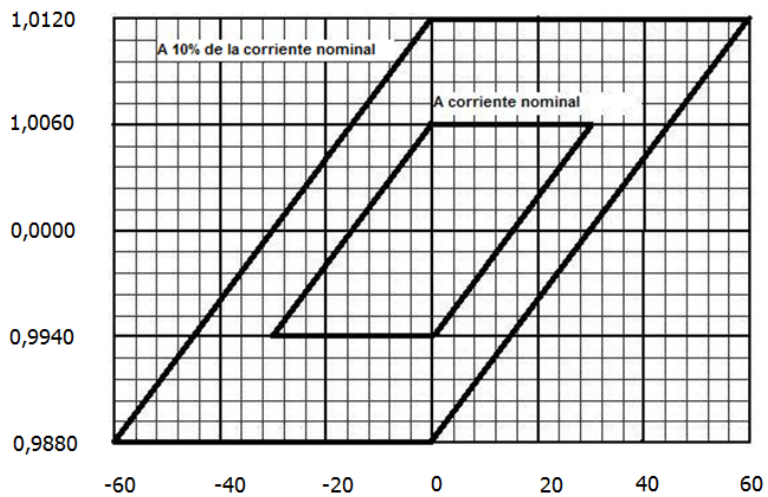
En las siguientes figuras se observan los paralelogramos que definen el comportamiento para las distintas clases de precisión de transformadores de voltaje y de corriente.

Figura 22. **Paralelogramo que define el comportamiento del transformador de corriente clase de precisión 0,3**



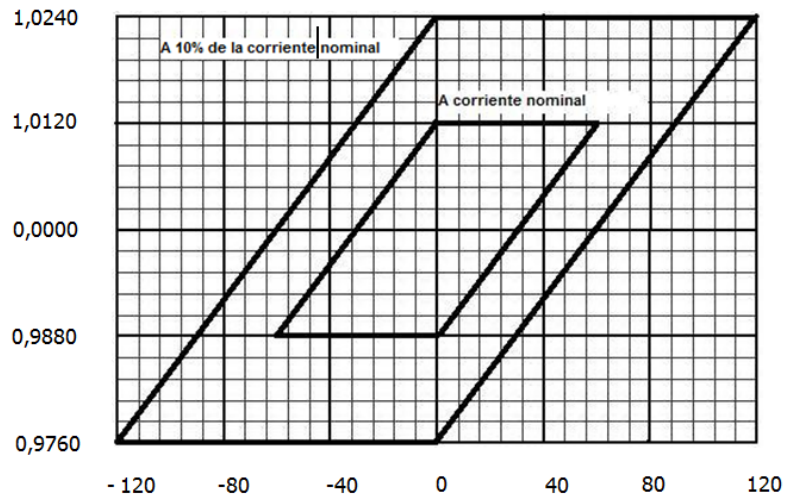
Fuente: elaboración propia, con datos de la Norma ANSI/IEEE C57.13.

Figura 23. **Paralelogramo que define el comportamiento del transformador de corriente clase de precisión 0,6**



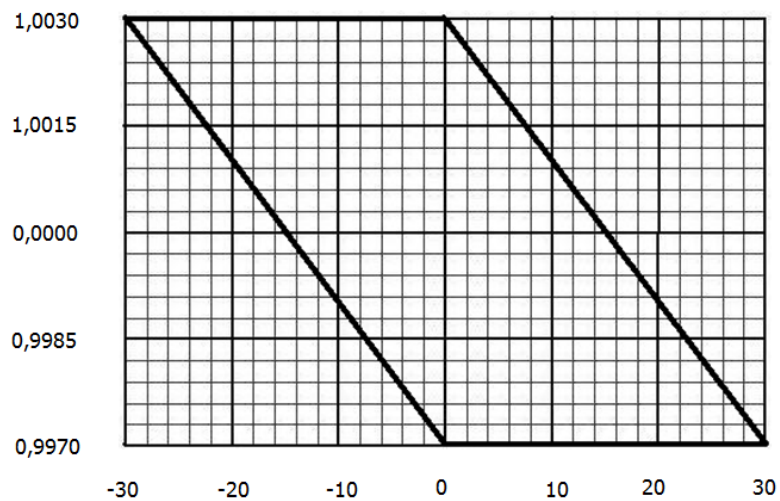
Fuente: elaboración propia, con datos de la Norma ANSI/IEEE C57.13.

Figura 24. **Paralelogramo que define el comportamiento del transformador de corriente clase de precisión 1,2**



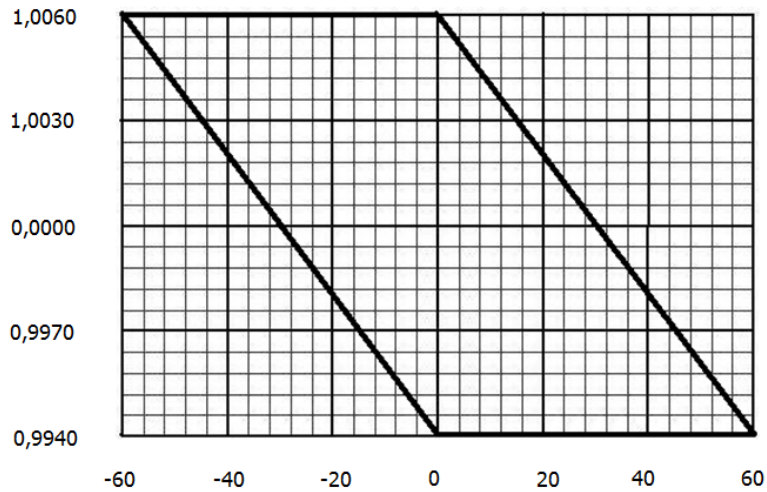
Fuente: elaboración propia, con datos de la Norma ANSI/IEEE C57.13.

Figura 25. **Paralelogramo que define el comportamiento del transformador de voltaje clase de precisión 0,3**



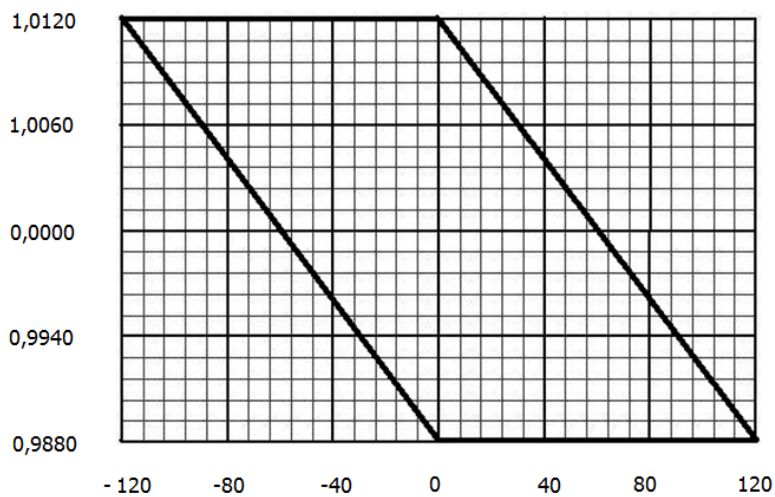
Fuente: elaboración propia, con datos de la Norma ANSI/IEEE C57.13.

Figura 26. **Paralelogramo que define el comportamiento del transformador de voltaje clase de precisión 0,6**



Fuente: elaboración propia, con datos de la Norma ANSI/IEEE C57.13.

Figura 27. **Paralelogramo que define el comportamiento del transformador de voltaje clase de precisión 1,2**

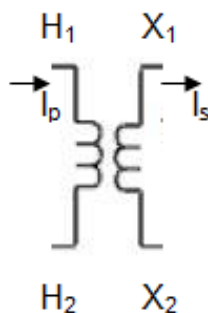


Fuente: elaboración propia, con datos de la Norma ANSI/IEEE C57.13.

Con respecto a la polaridad instantánea de los terminales primarios y secundarios, esta debe estar cláramente indicada con marcas permanentes. Generalmente dichas marcas vienen en el encapsulado del medidor y hechas con material del tipo epóxico, el cual, es difícil de borrar.

Los terminales del lado primario vendrán identificados con la letra “H” y los terminales del lado secundario vendrán identificados con la letra “X”. Para indicar la polaridad instantánea se identificará los dos terminales primarios del transformador de instrumento con un subíndice y se hará lo mismo con los terminales secundario. De esta forma, los terminales del lado primario serán H_1 y H_2 y los terminales del lado secundario serán llamados X_1 y X_2 . La polaridad instantánea será de tal manera que que cuando al terminal H_1 esté entrando la corriente, del lado secundario estará saliendo la corriente por X_1 . La figura 29 ilustrará mejor esto.

Figura 28. **Polaridad de los terminales de los transformadores de instrumento**



Fuente: modificado de CHAPMAN, Stephen J. Máquinas Eléctricas. p.85.

Cuando el transformador de instrumento tenga más de un arrollamiento secundario, se utilizará las letras del abecedario que siguen a la “X”, es decir,

las letras “Y” y “Z”; si se el transformador de instrumento tuviera 4 arrollamientos secundarios se utilizaría también la letra “W”, si tuviera 5 arrollamientos secundarios se utilizarían las letras “W” y “V” y si tuviera 6 arrollamientos secundarios se utilizaría también las letras “U”, “W” y “V”. Cada uno de los dos terminales de los arrollamientos también tendrán subíndices de tal manera que todos terminales con subíndice “1” tendrán la misma polaridad y así, todos los terminales con subíndice “2” también tendrán la misma polaridad.

Cuando en su arrollamiento primario el transformador de instrumento tenga más de un arrollamiento se utilizará únicamente la letra “H” para designarlos, cada par de terminales se designará por medio de subíndices consecutivos, es decir, si el transformador de instrumento tuviera 2 arrollamientos primarios, los terminales del primer arrollamiento serían H_1 y H_2 y los terminales del segundo arrollamiento serían H_3 y H_4 . Con respecto a la polaridad, todos los números impares deberán tener la misma polaridad y por ende, los terminales pares también deberán tener la misma polaridad entre si.

Cuando se tengan varias tomas, comúnmente llamadas taps, en el arrollamiento secundario, se utilizará la misma letra que denomina al arrollamiento pero con el subíndice se indicará cada una de las tomas y los números mayor y menor denominarán al inicio y final del arrollamiento en cuestión. Por ejemplo, si se tuviera un transformador de instrumento con 4 tomas en el arrollamiento secundario, las 4 tomas vendrían identificados como X_1 , X_2 , X_3 y X_4 ; pero además, los terminales X_1 y X_4 serían los terminales del inicio y final del arrollamiento. Algo muy importante que habrá que hacer ver es que, según la norma, el fabricante está obligado únicamente a garantizar la clase de precisión cuando se utilizan los arrollamientos completos.

Otro aspecto importante que hace ver la norma es que el *burden* o cargabilidad, están normados, es decir, no pueden tomar cualquier valor. Se dan tablas ilustrativas en donde se indica, dependiendo del tipo de transformador de instrumento, de voltaje o corriente, el *burden* que les corresponde.

Tabla IX. **Burden estandarizados para transformadores de corriente utilizados en medición con 5 amperios en el arrollamiento secundario**

Burden	Resistencia en ohmios	Inductancia en milihenrios	Impedancia en ohmios	Potencia en voltamperios (con 5 amperios)	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: modificado de norma ANSI/IEEE C57.13.

Todo transformador de corriente utilizado en medición debe de ser diseñado para uno de los *burden* de la tabla contenida en la figura anterior para que cumpla con la clase de precisión para la que fue diseñado. Por ejemplo se puede tener un transformador de corriente con clase de precisión 0,6 para usarse con un *burden* 0,5.

Dependiendo de si el transformador de corriente está diseñado para solamente para un *burden* específico o si abarca un grupo, la denominación en la placa de características variará. Volviendo al ejemplo anterior, si en la placa

de características del transformador de corriente se lee 0,6 @ B-0,5 eso quiere decir que solamente se garantiza la precisión de 0,6 con un *burden* de 0,5. Por otra parte, si en la placa de características del transformador de corriente se observa 0,6 B-0,5 eso quiere decir que se garantiza la precisión de 0,6 con el *burden* especificado y con los menores a este, es decir, B-0,2 y B-0,1.

Tabla X. **Burden estandarizados para transformadores de voltaje utilizados en medición**

Características estándar de burden			Características básicas en 120 voltios			Características básicas en 69.3 voltios		
Burden	Potencia en voltamperios	Factor de potencia	Resistencia en ohmios	Inductancia en milihenrios	Impedancia en ohmios	Resistencia en ohmios	Inductancia en milihenrios	Impedancia en ohmios
W	12,5	0,10	115,2	3,0400	1 152	38,4	1,0100	384
X	25,0	0,70	403,2	1,0900	576	134,4	0,3640	192
M	35,0	0,20	82,3	1,0700	411	27,4	0,3560	137
Y	75,0	0,85	163,2	0,2680	192	54,4	0,0894	64
Z	200,0	0,85	61,2	0,1010	72	20,4	0,0335	24
ZZ	400,0	0,85	30,6	0,0503	36	10,2	0,0168	12

Fuente: norma ANSI/IEEE C57.13.

Con respecto al *burden* de los transformadores de voltaje utilizados en medición, este se denomina con otras letras, de la W a la ZZ según se muestra en la tabla contenida en la figura anterior.

Similar al caso de los transformadores de corriente, los transformadores de voltaje se pueden diseñar para un *burden* específico o para un valor máximo de *burden*. Por ejemplo, un transformador en cuya placa de características se

lee "1,2Y" esto implica que la exactitud del transformador de instrumento es de 1,2 con un *burden* "Y" y también con los *burden* "M", "X" y "W". Por otra parte, si en la placa de características se lee "1,2@Y" la exactitud 1,2 solo se garantiza para el *burden* "Y".

También puede suceder que con los distintos *burden* la exactitud del transformador de voltaje varíe, en cuyo caso, en la placa de características se debiera de leer la precisión para cada uno de los *burden*, por ejemplo, que se tuviera un transformador de voltaje con *burden* "0,3Z" y "0,6ZZ", es decir un transformador de voltaje con una precisión de 0,3 con un *burden* "Z" y 0,6 con un *burden* "ZZ".

Otro aspecto que se estandariza con la norma son las relaciones de transformación tanto para transformadores de corriente como para transformadores de voltaje. En el caso de los transformadores de corriente, se cuenta con varias tablas cada una de ellas corresponde a transformadores de corriente con uno, dos o varios arrollamientos y/o tomas.

Para los transformadores de voltaje también se tienen tablas de los valores estandarizados para la relación de transformación, con la diferencia de que se tienen caracterizados algunos casos y aplicaciones específicas, los cuales dan origen a las distintas tablas. Se tiene de esta manera los siguientes grupos:

- Grupo 1: diseñados para funcionar con el 100 por ciento del voltaje nominal en la bobina primaria, ya sea para que se conecten sus terminales línea a línea o línea a tierra.

- Grupo 2: diseñados principalmente para conectarse sus terminales línea a línea. Se pueden utilizar en conexiones línea a neutro o línea a tierra a un voltaje igual al voltaje nominal dividido la raíz cuadrada de 3.
- Grupo 3: cuyo diseño contempla únicamente la conexión de los terminales línea a tierra y tienen dos arrollamientos secundarios.
- Grupo 4: diseñados únicamente para conectarse sus terminales línea a tierra y con un solo arrollamiento secundario.
- Grupo 5: cuyo diseño contempla que se utilizarán únicamente en interiores en sistemas aterrizados. La conexión de sus terminales será de línea a tierra únicamente.

Con respecto a los datos que deben ser consignados en la placa de características de los transformadores de instrumento, eso también está considerado en la norma y, dependiendo del tipo de transformador que se trate (de corriente o voltaje), variarán un poco los datos mínimos a ser consignados.

Para los transformadores de corriente, los datos mínimos a consignarse en la placa de características son:

- Nombre del fabricante o marca comercial
- Tipo de fabricante
- Número de serie del fabricante
- Relación de transformación de corriente y corriente secundaria
- Voltaje nominal o voltaje máximo del sistema
- Nivel básico de aislamiento al impulso
- Frecuencia nominal

- Factor de sobrecarga
- Clase de precisión

Para los transformadores de voltaje, los datos mínimos a consignarse en la placa de características son:

- Nombre del fabricante o marca comercial
- Tipo de fabricante
- Número de serie del fabricante
- Tensión nominal
- Relaciones de transformación
- Nivel básico de aislamiento al impulso
- Frecuencia nominal
- Burden
- Clase de precisión

La norma también abarca a los transformadores de instrumento utilizados para protección; sin embargo, este trabajo no trata de ellos y también hay otros puntos tales como pruebas de rutina para transformadores de instrumento y desmagnetización que tampoco son datos a considerar al momento de discriminar entre los diferentes tipos de transformadores de instrumento.

En el caso de los transformadores de instrumento de rango extendido, éstos deben cumplir con todo lo anterior mencionado en este capítulo, con la salvedad que, la clase de precisión y el *burden* correspondiente a estos transformadores de instrumento es distinta. La normativa específica que regula los dos puntos anteriores es la ANSI C57.13.6 creada en 2 005 y confirmada en 2 010. Dicha norma define las nuevas clases de precisión y *burden* indicados en

el capítulo 2 de esta tesis. También incluye pruebas de clase de precisión y los datos a consignarse en la placa de características.

En la placa de características de los transformadores de instrumento de rango extendido se debe incluir, además de lo visto en este capítulo, lo siguiente:

- Para los transformadores de corriente de rango extendido se deberá indicar, en el espacio para la clase de precisión, si su clase de precisión es 0,15 o 0,15 superior y, además, indicar el *burden* para el cual el transformador tiene dicha precisión.
- Para los transformadores de voltaje de rango extendido se deberá indicar, en el espacio para la clase de precisión, 0,15 y el *burden* para el cual el transformador tiene dicha precisión.

Con respecto a las pruebas de clase de precisión que deberán hacerse de rutina en la fábrica con los transformadores de instrumento de rango extendido, las pruebas deberán realizarse en 4 puntos específicos según la tabla XI.

Tabla XI. **Puntos específicos para pruebas de clase de precisión de los transformadores de instrumento de rango extendido**

Número de punto de prueba	Porcentaje de corriente nominal	Burden de prueba
1	100 por ciento	E-0.04
2	5 por ciento	Máximo burden
3	100 por ciento	Máximo burden
4	5 por ciento	E-0.04

Fuente: norma ANSI/IEEE C57.13.

En las pruebas hechas en los 4 puntos el comportamiento del transformador de corriente de rango extendido deberá permanecer dentro del paralelogramo que define su funcionamiento. Según la norma, un transformador de instrumento de rango extendido puede certificarse cuando puede demostrarse que, inherentemente, el transformador de instrumento cumple los límites especificados en la tabla anterior y hacerse solamente pruebas en los puntos uno y cuatro.

Con respecto a las pruebas de rutina en fábrica para los transformadores de voltaje de rango extendido, estas deberán realizarse al 100 por ciento del voltaje nominal y también a la frecuencia nominal. Las pruebas deberán realizarse en dos puntos:

- A cero burden
- Con el *burden* máximo

En ambos casos, el comportamiento del transformador de voltaje de rango extendido deberá permanecer dentro del paralelogramo que define su comportamiento.

4. COMPARACIÓN ENTRE LOS TRANSFORMADORES DE INSTRUMENTO TRADICIONALES Y LOS TRANSFORMADORES DE INSTRUMENTO DE RANGO EXTENDIDO

En los capítulos anteriores se han visto los transformadores de instrumento tradicionales y los transformadores de instrumento de rango extendido, la normativa que los regula y su comportamiento. En este capítulo se va a realizar una comparación entre los transformadores de corriente convencionales y los transformadores de corriente de rango extendido, así como también entre los transformadores de voltaje convencionales y los transformadores de voltaje de rango extendido

4.1. Similitudes entre los transformadores de instrumento tradicionales y los transformadores de instrumento de rango extendido

Hay muchas similitudes entre los transformadores de instrumento tradicionales y los transformadores de instrumento de rango extendido, al fin de cuentas, ambos se desarrollaron para ayudar a medir las mismas magnitudes.

Dentro de las similitudes entre ambos se puede destacar las siguientes:

- La forma de conexión de ambos son iguales. Estrella o delta, con o sin conexión al neutral, con las mismas ventajas y desventajas de cada una de las conexiones.

- Las formas que cada uno de ellos puede adoptar son las mismas. Pueden ser del tipo ventana, del tipo arrollado o del tipo barra. Si se trata de tipo ventana, pueden ser del mismo tamaño de ventana.
- Los voltajes nominales y/o corrientes nominales para los cuales se diseñan son de la misma magnitud. Regularmente, para trabajar en el secundario con una corriente nominal de 5 amperios, en el caso de los transformadores de corriente y para trabajar con un voltaje nominal igual a 120 voltios en el lado secundario, en el caso de los transformadores de voltaje.
- El valor del nivel básico de aislamiento para el que se diseñan es el mismo.
- Las frecuencias para las cuales se diseñan son las mismas. Para nuestro medio, se diseñan para 60 hertzios correspondientes a la frecuencia de nuestro sistema. Habrá que prestar atención a no conectar a una frecuencia que no sea para la cual se diseñaron.
- En cuanto a la localización en la instalación, se tiene también las variantes de instalación en interior y la instalación en el exterior.
- Las marcas de polaridad y las designaciones de los terminales continúan siendo las mismas.

4.2. Ventajas de los transformadores de rango extendido frente a los transformadores de instrumento tradicionales

Las diferencias técnicas existentes entre los transformadores de instrumento tradicionales y los transformadores de instrumento de rango extendido se deben básicamente a que los primeros se diseñaron y estandarizaron hace más de 30 años, con la tecnología de ese tiempo, cuando se utilizaban los medidores electromecánicos y los segundos se diseñaron y estandarizaron con el objetivo de ser más exactos y aprovechar el desarrollo tecnológico de los materiales usados en la construcción de los transformadores y medidores.

La utilización de los transformadores de instrumento de rango extendido trae aparejado varias ventajas tanto de índole operativa como de índole económico. Se iniciará con las ventajas operativas, que son cuatro, y se terminará con las ventajas económicas, que son dos. En específico, las ventajas existentes de los transformadores de instrumento de rango extendido con respecto a los transformadores de instrumento tradicionales son las siguientes:

- La clase de precisión: la primera de las ventajas operativas. Mientras que con los transformadores de instrumento tradicionales se puede obtener a lo sumo una precisión de 0,3 por ciento, con los transformadores de instrumento de rango extendido se puede conseguir una precisión de 0,15 por ciento. Además, con los transformadores de instrumento clase de precisión 0,15 superior se necesita solamente de un paralelogramo para describir su funcionamiento, mientras que para todos los demás se necesita de dos paralelogramos para describir su funcionamiento. Por norma, los transformadores de instrumento de rango extendido

garantizan su comportamiento desde el 5 por ciento de la corriente mientras que los transformadores de instrumento tradicionales garantizan su comportamiento desde el 10 por ciento de la corriente.

- El *burden*: puesto que los transformadores de instrumento se diseñaron para conectarse a medidores de estado sólido o digitales, se podrán conectar a un *burden* más pequeño. El *burden* más pequeño para los transformadores de corriente tradicionales es el *burden* 0,1, es decir de 2,5 voltamperios a 5 amperios de corriente, mientras que el *burden* más pequeño para los transformadores de corriente de rango extendido es el *burden* 0,04, es decir 1 voltamperio a 5 amperios de corriente. En estos últimos no se considera que el *burden* tenga una componente inductiva.
- Las pruebas: para los transformadores de corriente de rango extendido se tienen 4 puntos para las pruebas de rutina en la fábrica mientras que para los transformadores de corriente tradicionales se tienen solamente 2 puntos. Para los transformadores de corriente tradicionales los únicos puntos para hacer las pruebas son a 10 por ciento de la corriente nominal y a 100 por ciento de la corriente nominal conectando el transformador al *burden* con el que se tiene una precisión mayor. Por otra parte, para los transformadores de corriente de rango extendido se deben hacer pruebas a 5 por ciento y a 100 por ciento de la corriente nominal conectando el transformador al *burden* 0,04 y luego habrá que hacerlo nuevamente a 5 por ciento y a 100 por ciento de la corriente nominal conectando el transformador al *burden* máximo para el cual se diseñó.
- Versatilidad: el uso de los transformadores de instrumento de rango extendido presenta la ventaja que se puede tener una respuesta más

rápida cuando se requiera, reemplazar alguno que esté dañado. Esto se debe a que no es necesario tener a mano toda una gama de transformadores de corriente para poder reemplazar cualquier unidad. Es decir, si por ejemplo se dañara un transformador de corriente de relación simple, 50 a 5 y clase 0,3, que funcione normalmente a 50 amperios, o si se dañara un transformador de corriente de relación simple de 100 a 5 y clase 0,3, que funcione normalmente a 100 amperios y se usara transformadores tradicionales, en cada caso se tendría que reemplazar la unidad defectuosa por una exactamente igual para que cumpla con la exactitud correspondiente. Si por el contrario, las dos unidades de medición anteriores utilizaran transformadores de instrumento de rango extendido, con relación 100 a 5, en cualquiera de los dos casos se podrá reemplazar el transformador dañado por otro transformador de corriente con relación 100 a 5 sin que se pierda la exactitud. Es más, lo mismo sucede si se avería un transformador de corriente que esté funcionando a su corriente nominal y su relación simple sea 5 a 5, 10 a 5, 25 a 5, 40 a 5, 50 a 5, 75 a 5 100 a 5 y aún con relaciones mayores siempre que no excedan el factor de sobrecarga del transformador de instrumento de rango extendido. Visto de otra manera, no hace falta contar al mismo tiempo con toda una gama de relaciones de transformación, basta con tener una sola para estar cubiertos para eventualidades en unidades de medición con condiciones de carga distintas.

- Reducción de inventario: la primera ventaja económica. Esta ventaja es consecuencia de la versatilidad. Cuando se trabaja con transformadores de instrumento tradicionales habrá que tener por lo menos un juego de cada una de las relaciones de transformación de corriente. Por ejemplo, para las relaciones de transformación de corriente simples habrá que

tener un juego de cada uno de las relaciones, 10 a 5, 15 a 5, etc., hasta llegar a la relación 12 000 a 5, en otras palabras, habrá que contar con 20 juegos de transformadores de corriente solo para estar preparados ante una eventualidad (ver anexo G, tabla de las relaciones de transformación estandarizadas para transformadores de corriente con uno o dos relaciones de transformación). Mientras que con el uso de los transformadores de instrumento de rango extendido bastará con tener 5 juegos de relación 100:5, 1 200:5 y 1 2000:5, es decir, 15 juegos y estar preparados para cubrir cualquier emergencia que implique el cambio de algún juego entero de transformadores de corriente.

4.3. Comparación económica entre el uso de los transformadores de instrumento tradicionales y los transformadores de instrumento de rango extendido

En este apartado se realizará una comparación económica en el uso de los transformadores convencionales y transformadores de rango extendido. Se puede observar que las empresas distribuidoras de energía obtienen ventajas económicas con uso de los transformadores de instrumento de rango extendido, en dos sentidos:

- Primero, el más evidente, es que existe una mejora en la exactitud con que se mide la energía por el aumento de la precisión obtenido a través del uso de estos transformadores. Con dos situaciones concretas:
 - Una mejor facturación a través de todo valor que puede tomar la corriente de la carga.

- Una mejor facturación por debajo del 5 por ciento al 10 por ciento de la corriente nominal del transformador de instrumento en donde el comportamiento del transformador de instrumento tradicional no está definido.
- Segundo, se reduce la cantidad de transformadores de corriente existentes en el inventario. Esto es particularmente importante en el costo de inventario de una distribuidora de energía eléctrica, así como también para empresas que se dediquen a la venta y manufactura de equipo auxiliar de medición.

Para observar la primera de las ventajas, la de la mejora en la precisión a través de todo valor que puede tomar la corriente de carga, se propone a continuación un ejemplo.

Supóngase que en un sistema trifásico cuyo voltaje de fase es 13,8 kilovoltios se tiene una unidad monofásica de medición constituida por un transformador de corriente con relación de transformación simple de 1 200 a 5 amperios clase de precisión 0,3 (la de mayor exactitud para los transformadores de corriente tradicionales) y un transformador de voltaje con relación de transformación simple de 8 400/14 400 voltios, conexión estrella, con relación 70 a 1, es decir, con voltaje secundario de 115 voltios también clase de precisión 0,3 (también la de mayor exactitud para los transformadores de voltaje tradicionales) y se quiere saber cuál es la incerteza en la medición de energía eléctrica considerando únicamente los componentes que constituyen la unidad monofásica de medición.

Nótese que el transformador de voltaje está funcionando al 95,83 por ciento de su capacidad, puesto que está conectado a 13,8 kilovoltios y no a los

14,4 kilovoltios de su voltaje nominal, por tanto, se supone que el transformador de voltaje funciona correctamente. En el desarrollo del ejemplo se supondrá que la unidad monofásica de medición estará conectada a 8,400 voltios para hacer más sencillos los cálculos.

Según la norma, los transformadores de corriente pueden tener una variación del 0,3 por ciento cuando funcionan al 100 por ciento de su corriente nominal y del mismo modo, los transformadores de voltaje pueden tener una variación del 0,3 por ciento cuando funcionan desde el 90 por ciento al 110 por ciento de su voltaje nominal. La diferencia en la medición que puede ser tanto a favor del usuario como a favor de la empresa distribuidora de energía. Se considera en un primer momento el resultado más crítico para la distribuidora de energía eléctrica: que ambos transformadores de instrumento de la unidad de medición tengan una variación del 0,3 por ciento a favor del usuario.

La fórmula general para encontrar la potencia eléctrica es:

$$P = V \times I \times \text{f.p.} \quad (\text{Ecuación 4.1})$$

En donde, P es la potencia medida en vatios, V es el voltaje medido en voltios, I es la corriente medida en amperios y f.p. es el factor de potencia. Si se considera el factor de potencia con valor igual a 1, la fórmula general sería:

$$P = V \times I \quad (\text{Ecuación 4.2})$$

Entonces, la potencia medida (incluyendo su incerteza) denotada por el símbolo Δ , sería:

$$P - \Delta P = (V - \Delta V)(I - \Delta I) \quad (\text{Ecuación 4.3})$$

En donde ΔP es la incerteza en la medición de la potencia, ΔV es la incerteza en la medición del voltaje y ΔI es la incerteza en la medición de la corriente.

Operando:

$$P - \Delta P = VI - V\Delta I - I\Delta V + \Delta V\Delta I \quad (\text{Ecuación 4.4})$$

Como:

$$P - \Delta P = VI - (V\Delta I + I\Delta V - \Delta V\Delta I) \quad (\text{Ecuación 4.5})$$

Y de la fórmula general con factor de potencia igual a uno: $P = V \times I$

Se puede decir entonces que:

$$\Delta P = V\Delta I + I\Delta V - \Delta V\Delta I \quad (\text{Ecuación 4.6})$$

En esta ecuación no debe olvidarse que la variación en la potencia se resta de la potencia nominal puesto que se trata del caso en que los transformadores de instrumento registran menos de lo que deberían.

Si se calcula las incertezas para ambos transformadores de instrumento:

$$\Delta V = 0,003(8,400) = 25,2 \text{ V}$$

$$\Delta I = 0,003(1\ 200) = 3,6 \text{ A}$$

Entonces, con factor de potencia igual a uno, se tiene:

$$\Delta P = V\Delta I + I\Delta V - \Delta V\Delta I \quad (\text{Ecuación 4.6})$$

$$\Delta P = 8\,400(3,6) + 1\,200(25,2) - 3,6(25,2)$$

$$\Delta P = 60\,389,28 \text{ W}$$

O en las cantidades utilizadas para facturar:

$$\Delta P = 60,39 \text{ kilovatio}$$

Con respecto al consumo, el efecto de la incerteza es un poco más notorio. Si se supone que existe un usuario que permanentemente está utilizando la unidad monofásica anterior de tal manera que se utilicen los 1 200 amperios a 8 400 voltios, es decir, si se considera que la incerteza está presente a través de todo el tiempo que esté conectado el usuario al sistema, se tendrá lo siguiente:

De la ecuación de la energía:

$$E = P \times t \quad (\text{Ecuación 4.7})$$

Se tiene que:

$$\Delta E = \Delta P \times t \quad (\text{Ecuación 4.8})$$

Como, en un mes típico hay 30 días y en un día hay 24 horas, el tiempo mensual que se utiliza la unidad monofásica es de:

$$t = 30 \times 24 = 720 \text{ horas}$$

Entonces:

$$\Delta E = 60,39(720) = 43\,481 \text{ kilovatio-hora} \quad (\text{Ecuación 4.8})$$

Si ahora se quiere saber lo que representa esta diferencia en moneda bastará con multiplicar la suma anterior por la tarifa correspondiente. Lo más sencillo es suponer que se tiene una tarifa única. Si se supone una tarifa única de Q. 1,00 / kilovatio-hora para el cobro de la energía y una tarifa única de Q. 40.00 / kilovatio para la demanda, se tendrá lo siguiente:

$$\Delta P = 60,39 \times 40,00 = \text{Q. } 2\,415,60$$

$$\Delta E = 43\,481 \times 1,00 = \text{Q. } 43\,481,00$$

Por lo que el total del diferencial asciende a la suma de Q. 45 896,60 para la unidad monofásica, pero, si en lugar de ser una unidad monofásica se trata de una unidad trifásica, se tratará de una cantidad igual al triple de la anterior, es decir que la incerteza en la medición ascendería a Q. 137 689,80.

Ahora se va a comparar la incerteza encontrada en el ejemplo anterior con la incerteza que se tendría en una unidad compuesta de transformadores de rango extendido. Si ahora se supone que la unidad está compuesta siempre por un transformador de corriente con relación de transformación simple de 1 200 a 5 amperios clase de precisión 0,15 superior y un transformador de voltaje con relación de transformación simple de 8 400/14 400 voltios, conexión estrella, con relación 70 a 1 clase de precisión 0,15 funcionando ambos con el *burden* adecuado y en un sistema que funciona a 13,8 kilovoltios. Nótese que al igual que en el ejemplo anterior, el transformador de voltaje está funcionando al 95,83 por ciento de su capacidad y también se supondrá que la unidad

monofásica está conectada a un voltaje de 8 400 voltios para simplificar los cálculos.

Para el cálculo de la incerteza en la potencia se utiliza la ecuación 4.6 del ejemplo anterior solamente variará la magnitud de la incerteza debido a que son transformadores de instrumento de rango extendido.

$$\Delta P = V\Delta I + I\Delta V - \Delta V\Delta I \quad (\text{Ecuación 4.6})$$

Se calcula las incertezas:

$$\Delta V = 0,0015(8\ 400) = 12,6\ \text{V}$$

$$\Delta I = 0,0015(1\ 200) = 1,8\ \text{A}$$

Entonces, con factor de potencia igual a 1:

$$\Delta P = 8\ 400(1,8) + 1\ 200(12,6) - 1,8(12,6)$$

$$\Delta P = 30\ 217,32\ \text{W}$$

$$\Delta P = 30,22\ \text{kilovatio}$$

Ahora se utiliza la ecuación 4.8 para encontrar la incerteza en la medición de la energía.

$$\Delta E = \Delta P \times t \quad (\text{Ecuación 4.8})$$

Entonces:

$$\Delta E = 30,22(720) = 21\ 758\ \text{kilovatio-hora}$$

Suponiendo que se mantiene las tarifas del primer ejemplo, tarifa única de Q.1,00 por kilovatio-hora para el cobro de la energía y una tarifa única de Q.40,00 por kilovatio para la demanda, se tendrá lo siguiente:

$$\Delta P = 30,22 \times 40,00 = Q. 1\,208,80$$

$$\Delta E = 21\,758 \times 1,00 = Q. 21\,758,00$$

Para la unidad monofásica de medición de rango extendido, la incerteza total en la medición ascendería a Q. 22 966,80 y si se tratara de una unidad trifásica de medición, la incerteza ascendería a Q. 68 900,40

Como se puede observar, la incerteza en la medición de energía eléctrica se ha reducido con el uso de transformadores de instrumento de rango extendido desde Q. 137 689,80 a Q.68 900,40, es decir, se ha reducido en un 50 por ciento aproximadamente. La reducción se ha logrado al cambiar los transformadores de instrumento clase de precisión 0,3 por transformadores de instrumento clase de precisión 0,15 superior. Como se puede observar, la precisión también se incrementó en 50 por ciento, a ello se debe la reducción en la misma medida de la incerteza.

Cabe hacer notar que la diferencia económica entre usar los transformadores de instrumento tradicionales y los transformadores de instrumento de rango extendido fue de Q. 68 789,40 en un solo mes.

Para observar otro aspecto de las ventajas del uso de los transformadores de instrumento de rango extendido se hace nuevamente uso de las ecuaciones 4.6 y 4.8 se supone nuevamente que se utiliza las unidades de medición de los dos ejemplos anteriores solo que esta vez los transformadores de corriente estarán funcionando al 10 por ciento de su capacidad nominal.

Se empieza con la unidad de transformadores de instrumento tradicionales. Por estar funcionando al 10 por ciento de su capacidad nominal, el transformador de corriente tendrá una incerteza de 0,6 por ciento y el transformador de voltaje seguirá teniendo una incerteza de 0,3 por ciento.

$$\Delta P = V\Delta I + I\Delta V - \Delta V\Delta I \quad (\text{Ecuación 4.6})$$

Se calcula las incertezas:

$$\Delta V = 0,003(8\ 400) = 25,2\ \text{V}$$

$$\Delta I = 0,006(120) = 0,72\ \text{A}$$

Entonces:

$$\Delta P = 8\ 400(0,72) + 120(25,2) - 0,72(25,2)$$

$$\Delta P = 9\ 053,86\ \text{W}$$

$$\Delta P = 9,05\ \text{kilovatio}$$

Ahora se utiliza la ecuación 4.8 para encontrar la incerteza en la medición de la energía.

$$\Delta E = \Delta P \times t \quad (\text{Ecuación 4.8})$$

Entonces:

$$\Delta E = 9,05(720) = 6\ 516\ \text{kilovatio-hora}$$

Suponiendo que se mantiene las mismas tarifas del primer ejemplo, tanto para la energía como para la demanda, se tendrá lo siguiente:

$$\Delta P = 9,05 \times 40,00 = Q. 362,00$$

$$\Delta E = 6\,516 \times 1,00 = Q. 6\,516,00$$

Para la unidad monofásica de medición de rango extendido, la incerteza total en la medición ascendería a Q. 6 878,00 y si se tratara de una unidad trifásica de medición, la incerteza ascendería a Q. 20 634,00.

Ahora se hará el cálculo para la unidad de medición de energía utilizando transformadores de instrumento de rango extendido. Utilizando un transformador de corriente de clase de precisión 0,15 superior, la incerteza seguirá siendo de 0,15 por ciento aún cuando la corriente permanece en 10 por ciento de la corriente nominal.

$$\Delta P = V\Delta I + I\Delta V - \Delta V\Delta I \quad (\text{Ecuación 4.6})$$

Se calcula las incertezas:

$$\Delta V = 0,0015(8\,400) = 12,6 \text{ V}$$

$$\Delta I = 0,0015(120) = 0,18 \text{ A}$$

Entonces:

$$\Delta P = 8\,400(0,18) + 120(12,6) - 0,18(12,6)$$

$$\Delta P = 3\,021,73 \text{ W}$$

$$\Delta P = 3,02 \text{ kilovatio}$$

Ahora se utiliza la ecuación 4.8 para encontrar la incerteza en la medición de la energía.

$$\Delta E = \Delta P \times t \quad (\text{Ecuación 4.8})$$

Entonces:

$$\Delta E = 3,02(720) = 2\,174 \text{ kilovatio-hora}$$

Suponiendo que se mantiene las tarifas del primer ejemplo, tarifa única de Q.1.00 por kilovatio-hora para el cobro de la energía y una tarifa única de Q.40.00 por kilovatio para la demanda, se tendrá lo siguiente:

$$\Delta P = 3,02 \times 40,00 = \text{Q. } 154,80$$

$$\Delta E = 2\,174 \times 1,00 = \text{Q. } 2\,174,00$$

Para la unidad monofásica de medición de rango extendido, la incerteza total en la medición ascendería a Q. 2 294,80 y si se tratara de una unidad trifásica de medición, la incerteza ascendería a Q. 6 864,40.

Si se comparan ahora ambos valores, la incerteza obtenida con los transformadores de instrumento tradicionales, Q. 20 634,00, con la incerteza obtenida con los transformadores de instrumento de rango extendido, Q.6 884,40, se observa que existe una diferencia en la incerteza de Q.13 749,60.

Quizás una mejor manera para ver la diferencia económica entre utilizar los transformadores de instrumento tradicionales comparados con los transformadores de instrumento de rango extendido sea utilizar los datos anteriores para determinar en cuanto tiempo se recupera la inversión de comprar de rango extendido.

Se inicia por considerar los costos de adquirir la unidad trifásica de medición de la cual se habla en el ejemplo. Si se supone que el costo de los transformadores tradicionales, de corriente y voltaje, es de \$.900,00 y \$.800,00, respectivamente, y que el costo de los transformadores de rango extendido, de corriente y voltaje, es de \$.1 000,00 y \$.900,00 se tendrá la tabla XII.

Tabla XII. **Tabla de costos de inversión en unidades de medición trifásica en dólares estadounidenses**

	TRANSFORMA- DOR DE CORRIENTE	TRANSFORMA- DOR DE VOLTAJE	TOTAL
RANGO EXTENDIDO	\$. 3 000,00	\$. 2 700,00	\$. 5 700,00
TRADICIONAL	\$. 2 700,00	\$. 2 400,00	\$. 5 100,00
DIFERENCIA	\$. 300,00	\$. 300,00	\$. 600,00

Fuente: elaboración propia, con datos aproximados de mercado en 2011.

Si se supone que la tasa de cambio es de 8 dólares estadounidenses por cada quetzal, la diferencia de \$. 600,00 equivale a Q. 4 800,00. Con estos datos, ahora se encontrará en cuanto tiempo se recupera la inversión.

Debido a que de cualquier manera, al conectar un nuevo punto, la empresa distribuidora de energía debe invertir en la unidad de medición trifásica, ya sea tradicional o de rango extendido, interesará únicamente la diferencia entre adquirir la una o la otra. Es decir, interesa saber en cuanto tiempo se recuperará la diferencia en el costo de adquirir la una o la otra, la cual asciende a Q.4 800,00.

Para el primer caso se supondrá nuevamente que la unidad trifásica trabajará al 100 por ciento de su capacidad nominal. Como se vio, bajo esa

suposición la incerteza con los transformadores tradicionales es Q.137 689,80 al mes y con los transformadores de rango extendido es Q.68 900,40 al mes; se tiene entonces una diferencia de Q. 68 789,40 al mes. Con esos datos se obtiene lo siguiente:

$$\text{Período de recuperación} = \text{Q. } 4\,800,00 / \text{Q. } 68\,789,40 = 0,0698 \text{ meses}$$

Que es lo mismo que decir:

$$0,0698 \text{ meses} \times 30 \text{ días} / 1 \text{ mes} = 2,10 \text{ días}$$

Como se puede apreciar en el análisis anterior, se necesitará solamente de dos días y un décimo, aproximadamente, para recuperar la inversión.

Para el segundo caso se supondrá nuevamente que la unidad trifásica trabajará al 10 por ciento de su capacidad nominal. Como se vio, bajo esa suposición la incerteza con los transformadores tradicionales es de Q.20 634,00 al mes y con los transformadores de rango extendido es Q.6 884,40 al mes; se tiene entonces una diferencia de Q. 13 749,60 al mes. Con esos datos se obtiene lo siguiente:

$$\text{Período de recuperación} = \text{Q. } 4\,800,00 / \text{Q. } 13\,749,60 = 0,3491 \text{ meses}$$

Que es lo mismo que decir:

$$0,3491 \text{ meses} \times 30 \text{ días} / 1 \text{ mes} = 10,47 \text{ días}$$

Como se puede apreciar en el análisis anterior, se necesitará únicamente de diez días y medio, aproximadamente, para recuperar la inversión.

Como se observa, la recuperación de la inversión es bastante rápida para los equipos del ejemplo, en ambos casos es menor a un mes. En otros casos, en los que la corriente nominal del transformador de instrumento es más pequeña el período de recuperación será un tanto más lento; sin embargo, si se toma en cuenta el tiempo de vida que pueden tener los equipos, la inversión siempre se paga. Según la publicación 496 de 2 010 de la Hacienda Pública en los Estados Unidos, que es parte del Departamento del Tesoro de dicha nación, el tiempo de vida económico para sistemas de distribución y generación de energía eléctrica es de 19 años⁴, tiempo más que suficiente para recuperar la diferencia en la inversión.

Desde otro punto de vista, utilizando la tasa interna de retorno (TIR) como criterio para tomar la decisión de adquirir transformadores de instrumento de rango extendido, se considerará tres proyectos distintos. En el primero se considerará que se adquirirán transformadores de instrumento tradicionales, en el segundo se adquirirán transformadores de instrumento de rango extendido y éstos funcionarán al 100 por ciento y en el tercero también se adquirirán transformadores de instrumento de rango extendido pero que funcionarán al 10 por ciento de la corriente nominal.

Se considerará como período del proyecto un año y la depreciación al final de este se considerará del 5,26 por ciento tomando en cuenta la vida de 19 años considerada en la publicación 496 de la Hacienda Pública en Estados Unidos. Se tiene entonces las tablas XIII, XIV y XV cuyas cifras están en dólares estadounidenses y donde se ha considerado una tasa de cambio de 8 dólares estadounidenses por cada quetzal.

⁴ Publicación 496 del I.R.S. How to Depreciate Property tabla B-2, clase de activo 48.31.

Tabla XIII. **Tabla del proyecto de adquirir transformadores tradicionales**

MES	0	1	2	3	4	5	6
COSTO INICIAL	-\$.5 100,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00
VALOR RESCATE	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00
REDUCCIÓN DE INCERTEZA	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00
DEPRECIACIÓN	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00
TOTAL	-\$.5 100,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00
TIR=	-0,45 %						
VALOR PRESENTE NETO	-\$.576,04						

7	8	9	10	11	12
\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00
\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$4 831,74
\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00
\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$268,26
\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$4 831,74

Fuente: elaboración propia.

Bajo este punto de vista, nuevamente es superior el uso de los transformadores de rango extendido sobre los transformadores de instrumento tradicionales. La tasa interna de retorno indica que, en un solo año, se obtiene el retorno de la inversión inicial y todavía se supera.

Tabla XIV. **Tabla del proyecto de adquirir transformadores de rango extendido funcionando al 100 por ciento de su capacidad**

MES	0	1	2	3	4	5
COSTO INICIAL	-\$.5 700,00	\$.0,00	\$.0,00	\$.0,00	\$.0,00	\$.0,00
VALOR RESCATE	\$.0,00	\$.0,00	\$.0,00	\$.0,00	\$.0,00	\$.0,00
REDUCCIÓN DE INCERTEZA	\$.0,00	\$.8 598,68	\$.8 598,68	\$.8 598,68	\$.8 598,68	\$.8 598,68
DEPRECIACIÓN	\$.0,00	\$.0,00	\$.0,00	\$.0,00	\$.0,00	\$.0,00
TOTAL	-\$.5 700,00	\$.8 598,68	\$.8 598,68	\$.8 598,68	\$.8 598,68	\$.8 598,68
TIR=	150,85 %					
VALOR PRESENTE NETO	\$.98 944,22					

6	7	8	9	10	11	12
\$.0,00	\$.0,00	\$.0,00	\$.0,00	\$.0,00	\$.0,00	\$.0,00
\$.0,00	\$.0,00	\$.0,00	\$.0,00	\$.0,00	\$.0,00	\$.5 400,18
\$.8 598,68	\$.8 598,68	\$.8 598,68	\$.8 598,68	\$.8 598,68	\$.8 598,68	\$.8 598,68
\$.0,00	\$.0,00	\$.0,00	\$.0,00	\$.0,00	\$.0,00	\$.299,82
\$.8 598,68	\$.8 598,68	\$.8 598,68	\$.8 598,68	\$.8 598,68	\$.8 598,68	\$.13 998,86

Fuente: elaboración propia.

Desde el punto de vista del valor presente neto y tomando el valor del ritmo de la inflación para Guatemala según el Banco de Guatemala al 21 de noviembre de 2011, que es de 6,65 por ciento como la tasa de descuento del dinero, se puede considerar como gasto la compra de los transformadores

instrumento tradicionales, mientras que la compra de los transformadores instrumento de rango extendido se puede ver como una inversión.

Tabla XV. Tabla del proyecto de adquirir transformadores de rango extendido funcionando al 10 por ciento de su capacidad

MES	0	1	2	3	4	5
COSTO INICIAL	-\$.5 700,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00
VALOR RESCATE	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00
REDUCCIÓN DE INCERTEZA	\$0,00	\$1 718,70	\$1 718,70	\$1 718,70	\$1 718,70	\$1 718,70
DEPRECIACIÓN	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00
TOTAL	-\$.5 700,00	\$1 718,70	\$1 718,70	\$1 718,70	\$1 718,70	\$1 718,70
TIR=	30,08 %					
VALOR PRESENTE NETO	\$.19 261,81					

6	7	8	9	10	11	12
\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00
\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$5 400,18
\$1 718,70	\$1 718,70	\$1 718,70	\$1 718,70	\$1 718,70	\$1 718,70	\$1 718,70
\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$299,82
\$1 718,70	\$1 718,70	\$1 718,70	\$1 718,70	\$1 718,70	\$1 718,70	\$7 118,88

Fuente: elaboración propia

Por último con respecto a la ventaja en la reducción del inventario, esta está directamente relacionada con el costo de almacenamiento y del equipo.

Utilizando transformadores de instrumento tradicionales toda compañía debería tener en sus existencias por lo menos un juego trifásico de cada una de las relaciones de transformación existentes según norma para responder a cualquier necesidad de mantenimiento; sin embargo, con los transformadores de corriente de rango extendido con clase de precisión 0,15 superior se puede fácilmente contar con solamente algunos juegos de transformadores con relación de transformación 100:5, 1 200:5 y 12 000:5 y estar seguro de que se cuenta con los necesarios ante cualquier necesidad de mantenimiento. De esta manera se ahorrará en costo de inventario y a la vez que se cuenta con mayor versatilidad al momento de tener que atender cualquier emergencia.

CONCLUSIONES

1. La normativa que regula y hace posible la existencia y normalización de los transformadores de instrumento de rango extendido es la norma ANSI C57.13.6 creada en 2005.
2. Se entiende como transformador de rango extendido a aquel cuya clase de precisión es de 0,15 o mayor y cuyo *burden* es adecuado para conectar medidores electrónicos.
3. Las ventajas que presentan los transformadores de rango extendido frente a los transformadores tradicionales son: una mayor precisión, un *burden* más pequeño que los hace adecuados para conectarles medidores electrónicos, reducción del inventario necesario para mantenimiento y normalización de los factores de multiplicación de las lecturas de los medidores.
4. Los transformadores de corriente de rango extendido se pueden utilizar en cualquier aplicación en la que se requiera tener una medición con equipo de medición auxiliar o medición indirecta y su uso deberá ser obligatorio en los casos en los que las corrientes de carga sean muy variables.
5. Cuando se utilizan transformadores de corriente de rango extendido, el mejoramiento de la medición de energía eléctrica se logra gracias a la superior clase de precisión que poseen.

6. Las inversiones hechas en compra de equipos de medición de rango extendido pueden recuperarse en menos de un año.
7. Los transformadores de instrumento de rango extendido son ideales para utilizarse conjuntamente con medidores electrónicos.

RECOMENDACIONES

1. Las mediciones de energía eléctrica con equipo auxiliar, que utilicen medidores electrónicos, deberán utilizar transformadores de instrumento de rango extendido.
2. Se debe identificar todos los casos con medición indirecta y carga muy fluctuante, para asegurarse que cuentan con equipo de medición auxiliar que utilice transformadores instrumento de rango extendido.
3. En todos aquellos casos en que la carga es muy fluctuante, es importante tomar como obligatoria la utilización de los transformadores de instrumento de rango extendido y cambiarlos en el corto plazo.
4. Los transformadores de instrumento de rango extendido conviene ser usados por las empresas distribuidoras de energía eléctrica para mejorar su desempeño económico y operativo.
5. Se invita a las empresas distribuidoras de energía a hacer un análisis económico del uso de los transformadores de instrumento de rango extendido para que puedan observar las ventajas de su uso.

BIBLIOGRAFÍA

1. CHAPMAN, Stephen J. *Máquinas eléctricas*. 4a ed. México: McGraw-Hill, 1997. 768 p.
2. DAWES, Chester L. *Electricidad industrial*. Barcelona: Reverté, 1981. 574 p.
3. Department of the Treasury. *How to Depreciate Property, Internal Revenue Service*. 2011. [en línea] Publication 946. <http://www.irs.gov/pub/irs-pdf/p946.pdf> [Consulta: 20 de junio de 2011].
4. FINK, Donald G.; BEATY, H. Wayne. *Manual de Ingeniería Eléctrica*. México: McGraw-Hill, 1996. 2144 p.
5. General Assembly State of Connecticut. *An Act Concerning Electricity and Energy Efficiency*. [en línea] <http://www.cga.ct.gov/2007/AMD/H/2007HB-07432-R00HA-AMD.htm> [Consulta: 21 de abril de 2011].
6. Independent Electricity System Operator. *High Accuracy Instrument Transformer Update*. [en línea] <http://www.ieso.ca/imowebpub/200911/rm-20091008-05-HAIT-WG-Status-Update.pdf> [Consulta: 26 de marzo de 2011].

7. Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos; Instituto Nacional Estadounidense de Estándares. *IEEE Standards requirements for instrument transformers: ANSI/IEEE C57.13.6 1978*. Nueva York: IEEE, 1978. 62 p.
8. _____. *Standards requirements for high accuracy instrument transformers: ANSI/IEEE C57.13.6 2005*. Nueva York: IEEE, 2005. 6 p.
9. _____. *Standards requirements for instrument transformers: ANSI/IEEE C57.13.6 2008*. Nueva York: IEEE, 2008. 82 p.
10. LE, Hoan D. *Se necesita la vestimenta adecuada, el paso siguiente en transformadores de instrumento para exteriores*. ABB Power Technologies. 2008. Revista ABB. 2008, número 4, p. 51-54
11. One Hundred Tenth Congress of the United States of America. *Energy Independence and Security Act of 2007*. [en línea] <http://www.gpo.gov/fdsys/pkg/BILLS-110hr6enr/pdf/BILLS-110hr6enr.pdf> [Consulta: 21 de abril de 2011].
12. Ritz Instrument Transformers. *Applying 600V High-Accuracy Current Transformers for Revenue Metering Applications*. [en línea] <http://www.ritzusa.com/Resources/45.pdf> [Consulta: 21 de marzo de 2011].
13. SERWAY, Raymond A. *Física*. Tomo II. 4a ed. México: McGraw-Hill, 1997. 448 p.

ANEXOS

Anexo A. **Tabla de las relaciones de transformación estandarizadas para transformadores de voltaje del grupo uno**

Rated voltage (V)	Marked ratio
120 / 208Y	1:1
240 / 416Y	2:1
300 / 520Y	2.5:1
120 / 208Y	1:1
240 / 416Y	2:1
300 / 520Y	2.5:1
480 / 832Y	4:1
600 / 1040Y	5:1
2400 / 4160Y	20:1
4200 / 7270Y	35:1
4800 / 8320Y	40:1
7200 / 12 470Y	60:1
8400 / 14 400Y	70:1
12 000 / 20 750Y	100:1
14 400 / 24 940Y	120:1

Fuente: Norma ANSI/IEEE C57.13.

Anexo B. **Tabla de las relaciones de transformación estandarizadas para transformadores de voltaje del grupo cuatro**

Rated voltage (V)	Marked ratio
7200/12470 Grd Y	60:1
8400/14000 Grd Y	70:1
12000/20780 Grd Y	100:1
14400/24940 Grd Y	120:1
20125/34500 Grd Y	175:1

Fuente: Norma ANSI/IEEE C57.13.

Anexo C. **Tabla de las relaciones de transformación estandarizadas para transformadores de corriente con relación de transformación múltiple**

Current ratings (A)		Secondary taps	Current ratings (A)		Secondary tap
	600:5			3000:5	
50:5		X2 – X3	300:5		X3 – X4
100:5		X1 – X2	500:5		X4 – X5
150:5		X1 – X3	800:5		X3 – X5
200:5		X4 – X5	1000:5		X1 – X2
250:5		X3 – X4	1200:5		X2 – X3
300:5		X2 – X4	1500:5		X2 – X4
400:5		X1 – X4	2000:5		X2 – X5
450:5		X3 – X5	2200:5		X1 – X3
500:5		X2 – X5	2500:5		X1 – X4
600:5		X1 – X5	3000:5		X1 – X5
	1200:5			4000:5	
100:5		X2 – X3	500:5		X1 – X2
200:5		X1 – X2	1000:5		X3 – X4
300:5		X1 – X3	1500:5		X2 – X3
400:5		X4 – X5	2000:5		X1 – X3
500:5		X3 – X4	2500:5		X2 – X4
600:5		X2 – X4	3000:5		X1 – X4
800:5		X1 – X4	3500:5		X2 – X5
900:5		X3 – X5	4000:5		X1 – X5
1000:5		X2 – X5			
1200:5		X1 – X5			
	2000:5			5000:5	
300:5		X3 – X4	500:5		X2 – X3
400:5		X1 – X2	1000:5		X4 – X5
500:5		X4 – X5	1500:5		X1 – X2
800:5		X2 – X3	2000:5		X3 – X4
1100:5		X2 – X4	2500:5		X2 – X4
1200:5		X1 – X3	3000:5		X3 – X5
1500:5		X1 – X4	3500:5		X2 – X5
1600:5		X2 – X5	4000:5		X1 – X4
2000:5		X1 – X5	5000:5		X1 – X5

Fuente: Norma ANSI/IEEE C57.13.

Anexo D. **Tabla de las relaciones de transformación estandarizadas para transformadores de voltaje del grupo tres**

Rated voltage (V)	Marked ratio
14400/24940 Grd Y	120/200 & 120/200:1
20125/34500 Grd Y	175/300 & 175/300:1
27600/46000 Grd Y	240/400 & 240/400:1
40250/69000 Grd Y	350/600 & 350/600:1
69000/115000 Grd Y	600/1000 & 600/1000:1
80500/138000 Grd Y	700/1200 & 700/1200:1
92000/161000 Grd Y	800/1400 & 800/1400:1
138000/230000 Grd Y	1200/2000 & 1200/2000:1
207000/345000 Grd Y	1800/3000 & 1800/3000:1
287500/500000 Grd Y	2500/4500 & 2500/4500:1
431250/750000 Grd Y	3750/6250 & 3750/6250:1

Fuente: Norma ANSI/IEEE C57.13.

Anexo E. **Tabla de las relaciones de transformación estandarizadas para transformadores de voltaje del grupo cuatro**

Group	Rated voltage (V)	Marked ratio
Group 4A: For operations at approximately 100% of rated voltage (see Figure 6f)	2400/4160 Grd Y	20:1
	4200/7200 Grd Y	35:1
	4800/8320 Grd Y	40:1
	7200/12470 Grd Y	60:1
	8400/14400 Grd Y	70:1
Group 4B: For operation at approximately 58% of rated voltage (see Figure 6g)	4160/4160 Grd Y	35:1
	4800/4800 Grd Y	40:1
	7200/7200 Grd Y	60:1
	12000/12000 Grd Y	100:1
	14400/14400 Grd Y	120:1

Fuente: Norma ANSI/IEEE C57.13.

Anexo F. **Tabla de las relaciones de transformación estandarizadas para transformadores de voltaje del grupo dos**

Rated voltage (V)	Marked ratio
120/120Y	1:1
240/240Y	2:1
300/300Y	2.5:1
480/480Y	4:1
600/600Y	5:1
2400/4160Y	20:1
4800/4800Y	40:1
7200/7200Y	60:1
12000/12000Y	100:1
14400/14400Y	120:1
24000/24000Y	200:1
34500/34500Y	300:1
46000/46000Y	400:1
69 000/69000Y	600:1

Fuente: Norma ANSI/IEEE C57.13.

Anexo G. **Tabla de las relaciones de transformación estandarizadas para transformadores de corriente con uno o dos relaciones de transformación**

		Current ratings (A)	
Single ratio		Double ratio with series-parallel primary windings	Double ratio with taps in secondary winding
10:5	800:5	25 × 50:5	25/50:5
15:5	1200:5	50 × 100:5	50/100:5
25:5	1500:5	100 × 200:5	100/200:5
40:5	2000:5	200 × 400:5	200/400:5
50:5	3000:5	400 × 800:5	300/600:5
75:5	4000:5	600 × 1200:5	400/800:5
100:5	5000:5	1000 × 2000:5	600/1200:5
200:5	6000:5	2000 × 4000:5	1000/2000:5
300:5	8000:5		1500/3000:5
400:5	12000:5		2000/4000:5
600:5			

Fuente: Norma ANSI/IEEE C57.13.