



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

**ANÁLISIS DE VENTAJAS TÉCNICO-ECONÓMICAS DE EQUIPO
ELECTRÓNICO BAJA TENSIÓN EN PRUEBAS DE TRANSFORMADORES
INSTRUMENTO EN DISTRIBUIDORAS DE ENERGÍA ELÉCTRICA**

Nelson Raúl Méndez Coronado

Asesorado por el Ing. Rogelio Giovanni Salazar Donis

Guatemala, enero de 2015

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**ANÁLISIS DE VENTAJAS TÉCNICO-ECONÓMICAS DE EQUIPO
ELECTRÓNICO BAJA TENSIÓN EN PRUEBAS DE TRANSFORMADORES
INSTRUMENTO EN DISTRIBUIDORAS DE ENERGÍA ELÉCTRICA**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

NELSON RAÚL MÉNDEZ CORONADO
ASESORADO POR EL ING. ROGELIO GIOVANNI SALAZAR DONIS

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO ELECTRÓNICO

GUATEMALA, ENERO DE 2015

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Murphy Olympto Paiz Recinos
VOCAL I	Ing. Angel Roberto Sic García
VOCAL II	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL III	Inga. Elvia Miriam Ruballos Samayoa
VOCAL IV	Br. Narda Lucía Pacay Barrientos
VOCAL V	Br. Walter Rafael Véliz Muñoz
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Murphy Olympto Paiz Recinos
EXAMINADOR	Ing. Carlos Eduardo Guzmán Salazar
EXAMINADOR	Ing. Armando Alonso Rivera Carrillo
EXAMINADOR	Ing. Marvin Marino Hernández Fernández
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

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

ANÁLISIS DE VENTAJAS TÉCNICO-ECONÓMICAS DE EQUIPO ELECTRÓNICO BAJA TENSIÓN EN PRUEBAS DE TRANSFORMADORES INSTRUMENTO EN DISTRIBUIDORAS DE ENERGÍA ELÉCTRICA

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, con fecha 17 de octubre de 2013.



Nelson Raúl Méndez Coronado

Guatemala, Octubre 2014

Ingeniero
Guillermo Antonio Puente Romero
DIRECTOR
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica
Facultad de Ingeniería, Usac.

Ingeniero Puente Romero:

Por este medio atentamente le informo que como Asesor del estudiante: **Nelson Raúl Méndez Coronado, Carné No. 93-12114**, procedí a revisar el Trabajo de Graduación, cuyo título es: **ANÁLISIS DE VENTAJAS TÉCNICO-ECONÓMICAS DE EQUIPO ELECTRÓNICO BAJA TENSIÓN EN PRUEBAS DE TRANSFORMADORES INSTRUMENTO EN DISTRIBUIDORAS DE ENERGÍA ELÉCTRICA.**

En tal virtud, **LO DOY POR APROBADO**, solicitándole darle el trámite respectivo.

Sin otro particular, me es grato suscribirme.



Ing. Rogelio Giovanni Salazar Donis

Colegiado 4529

ASESOR

Rogelio Giovanni Salazar Donis
Ingeniero Electricista
Guatemala,
Colegiado No. 4529



Ref. EIME 49.2014
Guatemala, 16 de OCTUBRE 2014.

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:
ANÁLISIS DE VENTAJAS TÉCNICO-ECONÓMICAS DE EQUIPO
ELECTRÓNICO BAJA TENSIÓN EN PRUEBAS DE
TRANSFORMADORES INSTRUMENTO EN DISTRIBUIDORAS
DE ENERGÍA ELÉCTRICA, del estudiante Nelson Raúl Méndez
Coronado, que cumple con los requisitos establecidos para tal fin.**

Sin otro particular, aprovecho la oportunidad para saludarle.

Atentamente,
DID Y ENSEÑAD A TODOS


Ing. Carlos Eduardo Guzmán Salazar
Coordinador Área Electrónica



3/0



REF. EIME 49. 2014.

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; NELSON RAÚL MÉNDEZ CORONADO . titulado: ANÁLISIS DE VENTAJAS TÉCNICO-ECONOMÓMICAS DE EQUIPO ELECTRÓNICO BAJA TENSIÓN EN PRUEBAS DE TRANSFORMADORES INSTRUMENTO EN DISTRIBUIDORAS DE ENERGÍA ELÉCTRICA, procede a la autorización del mismo.

Ing. Guillermo Antonio Puente Romero



GUATEMALA, 2 DE NOVIEMBRE 2014.



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: **ANÁLISIS DE VENTAJAS TÉCNICO-ECONÓMICAS DE EQUIPO ELECTRÓNICO BAJA TENSIÓN EN PRUEBAS DE TRANSFORMADORES INSTRUMENTO EN DISTRIBUIDORAS DE ENERGÍA ELÉCTRICA**, presentado por el estudiante universitario: **Nelson Raúl Méndez Coronado**, y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, se autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE.

Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
Decano



Guatemala, enero de 2015

ACTO QUE DEDICO A:

El Creador	Quien dotó al hombre de intelecto y de la capacidad de amar para poderlo conocer.
Mi madre	María Elena Coronado, quien con amor y sacrificio forjó noble ideal, convertido en ya tres amorosos triunfadores. El mérito es de ella.
Mi esposa	Susana Solís, porque con su amor y paciencia, me ha brindado el apoyo y ayuda necesaria para este logro.
Mi hija	Luna, quien con su inocencia me inspira a ser mejor cada día, en todos los aspectos humanos posibles.
Mis hermanos	Amados ejemplos a seguir, a todos y cada uno, con especial cariño.
Mi abuela	Consuelo Ligorria, quien con amor y paciencia me enseñó a leer y escribir, iniciándome en mi camino académico.

AGRADECIMIENTOS A:

Mi padre	Manolo Méndez, quien con su esfuerzo y ejemplo de trabajo duro y sacrificio ha contribuido a la realización de este logro.
Mis padrinos	Guillermo Coronado, Emma Lilly Monteagudo (q.e.p.d.), Dr. Arnoldo Escobar y Dra. Gladys Corzo, por su cariñoso y desinteresado apoyo.
Mis tíos y primos	Porque cada uno ha sido distintamente especial y cariñoso con mi persona.
Mis cuñados	Martha María Solís y Juan Carlos Solís, por su apoyo y cariño.
Mi asesor	Ing. Giovanni Salazar, por su entusiasmo, apoyo, consejo y paciencia; claves para la realización de este logro.
Empresa Eléctrica de Guatemala, S. A.	Mi especial agradecimiento por ser el ambiente idóneo para realizar este proyecto.
Omicron Electronics GmbH.	En especial al Ing. Luis Balderas e Ing. Miguel Gutiérrez, por su invaluable ayuda en la realización de este informe.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	III
LISTA DE SÍMBOLOS	VII
GLOSARIO	IX
RESUMEN	XIII
OBJETIVOS.....	XV
INTRODUCCIÓN	XVII
1. TRANSFORMADORES DE INSTRUMENTO	1
1.1. Diseño de transformadores de instrumento.....	1
1.1.1. Principios de funcionamiento	2
1.1.2. Componentes de un transformador de instrumento ...	5
1.1.3. Proceso de magnetización.....	9
1.1.4. Clasificación de los transformadores de instrumento.....	11
2. VERIFICACIÓN DE TRANSFORMADORES DE INSTRUMENTO DE ACUERDO CON LA NORMATIVA INTERNACIONAL.....	19
2.1. Circuitos típicos para prueba y calibración de transformadores de instrumento, según normativa internacional	19
2.1.1. Método para transformadores de corriente.....	19
2.1.2. Método para transformadores de voltaje	21

3.	CLASES DE EQUIPOS PARA PRUEBAS DE TRANSFORMADORES DE INSTRUMENTO	23
3.1.	Equipos de inyección de corriente en primario a escala de valor nominal.....	23
3.2.	Equipos de inyección de corriente en primario.....	28
3.3.	Equipos de baja tensión/baja frecuencia.....	30
4.	COMPARACIÓN ENTRE EQUIPOS TRADICIONALES Y EQUIPOS DE BAJA FRECUENCIA Y BAJA TENSIÓN Y CORRIENTE PARA PRUEBA DE TRANSFORMADORES DE INSTRUMENTACIÓN.....	43
4.1.	Comparación de factores entre equipo tradicional y equipo de baja frecuencia y baja tensión	43
4.1.1.	Peso y portabilidad.....	44
4.1.2.	Exactitud.....	45
4.1.3.	Manejo y productividad	45
4.1.4.	Tiempo de montaje y pruebas	46
4.1.5.	Posibilidad de actualizaciones.....	47
4.1.6.	Recalibraciones.....	47
4.1.7.	Pruebas de transformadores de corriente de múltiples relaciones	48
4.1.8.	Comparación de costos.....	48
4.2.	Análisis de retorno de inversión para equipo de baja frecuencia y baja tensión (CT Analyzer de Omicron Electronics)	51
	CONCLUSIONES.....	59
	RECOMENDACIONES	61
	BIBLIOGRAFÍA.....	63
	ANEXOS.....	65

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Transformadores de instrumento y sus símbolos.....	2
2.	El transformador.....	3
3.	Modelos (completo y simplificado) del transformador de instrumento.....	5
4.	Transformador de corriente CTA 145 serie Balteau de Alsthom.	7
5.	Transformador de corriente seccionado.....	8
6.	Transformador de corriente para media tensión modelo KOR-11 de ABB, antes y después del encapsulado en poliuretano.	8
7.	Dominios magnéticos y estados de magnetismo	9
8.	Lazo de histéresis trazado por el flujo de un núcleo ferromagnético ante una corriente alterna $i(t)$	10
9.	Esquema conceptual de conexión de transformadores de voltaje y de corriente, para medición y protección.....	12
10.	Unidades de TI diversas para interior/externo.....	13
11.	Unidades de medición Trench de 69 kV en subestación.....	16
12.	Encapsulados diversos, caucho butílico, poliuretano y HCEP.	17
13.	Prueba de exactitud en transformadores de corriente por comparador de corrientes compensado (nulo comparativo).....	19
14.	Circuito para prueba de exactitud en transformador de voltaje, método de relación de capacitancias y comparador.	22
15.	Esquema de prueba para transformador de instrumento con inyección de corrientes a escala nominal en subestación.	24

16.	Vistas del montaje de equipo para prueba de transformadores de instrumento con inyección de corriente a escala nominal en subestación	25
17.	Comparador 4764 de Tettex Instruments y el diseño de sus devanados.....	27
18.	Prueba de determinación de curva de magnetización con corrientes nominales.....	28
19.	Circuito de prueba típico para inyección de corriente en primario y equipo PCITS2000/2 de Megger.....	29
20.	Sistema de prueba de inyección de corriente en primario Ingvar de Megger.....	30
21.	Conexión del CT Analyzer para una prueba de transformador de corriente.....	33
22.	Conexión del CT Analyzer para una prueba de carga o <i>burden</i> conectado a un transformador de corriente.....	34
23.	Conexión del CT Analyzer para una prueba de relación de vueltas en un transformador de voltaje.....	34
24.	Técnicas de saturación y desmagnetización de CT Analyzer	36
25.	Diagrama de bloques del equipo CT Analyzer de Omicron para prueba de transformadores de instrumento	38
26.	Descripción de controles y entradas de CT Analyzer.....	39
27.	Pantallas de menú de las fases de prueba de CT Analyzer.....	40
28.	Curvas de error de relación y curva de excitación como parte de un reporte generado para un transformador de corriente.	41
29.	Cotización de equipo de baja tensión y baja frecuencia puesto en Guatemala.....	49

TABLAS

I.	Características del comparador de corriente Tettex 4764.....	26
II.	Captura gráfica de reporte de resultados de una prueba del CT Analyzer de un transformador de corriente	42
III.	Comparación de parámetros en tres clases de equipo para pruebas de transformadores de instrumento.....	49
IV.	Costos de calibración realizada por terceros para transformadores de corriente (por unidad)	52
V.	Montos actuales por servicios de calibración realizados por terceros para transformadores de instrumento	53
VI.	Hoja de cálculo de retorno sobre inversión para adquisición de equipo CT Analyzer de Omicron Electronics.....	55
VII.	Criterio para selección de tamaños de muestra de transformadores de instrumento, según tamaños de lote de acuerdo con la norma ANSI/ASQ Z1.4-2008	57
VIII.	Escenarios ponderados para determinar inventario de carga de trabajo anual de calibración de transformadores de instrumento	58

LISTA DE SIMBOLOS

Símbolo	Significado
A	Amperio
C	Capacitancia
I	Corriente
B	Densidad de campo magnético
\$	Dólar
φ	Flujo magnético
ε	Fuerza electromotriz
°	Grado sexagesimal
Hz	Hertzio
Z	Impedancia
H	Intensidad de campo magnético
kg	Kilogramo
kW	Kilovatio
kWh	Kilovatio-hora
kV	Kilovoltio
lb	Libra
mA	Miliamperio
mH	Milihenrio
mm	Milímetro
n	Número de vueltas de un devanado
Ω	Ohmio
ppm	Partes por millón
P	Potencia

H1, H2	Primer y segundo polo primario
X1, X2	Primer y segundo polo secundario
Q	Quetzal
R	Resistencia
s	Segundo
V	Voltaje, voltio
VA	Voltio-amperio
VAC	Voltios en corriente alterna
VDC	Voltios en corriente directa

GLOSARIO

AG	Siglas en alemán para <i>Aktiengesellschaft</i> , sociedad de accionistas, entidad legal privada común en países de habla germana.
Amperio	Unidad de medida de la corriente eléctrica equivalente al paso de un Coulomb de carga por un nodo de un circuito en un segundo.
ANSI	Siglas en Inglés del Instituto Nacional Americano de Normas.
Bobina	Arrollado de conductor en torno a un núcleo para convertir energía eléctrica en campo magnético y viceversa.
BT	Baja tensión, tecnicismo para referirse a nivel de tensión secundario de la red de distribución, 120/240/480 voltios.
Burden	Valor de resistencia del circuito conformado por conductores y medidores de energía conectados al secundario de un transformador de instrumento.

Bus de control	Conjunto de señales de control de las unidades de una computadora y por extensión, también la agrupación física de sus conductores.
<i>Bushing</i>	Conjunto de conector y aislador que permite conectar de forma segura y sin arco eléctrico el punto de conexión externo de un transformador con el punto interno (devanado).
Circuito	Interconexión de elementos eléctricos para transferir energía de un punto a otro.
<i>Compact flash</i>	Formato de memoria <i>flash</i> de almacenamiento masivo, desarrollado en 1994 por SanDisk, para dispositivos móviles.
Consumo	Medición acumulada de energía utilizada por un usuario en un lapso determinado.
Convertidor AC/DC	Circuito electrónico que rectifica una señal de corriente alterna entregando la potencia con un valor de voltaje constante en corriente directa.
Convertidor DC/DC	Circuito electrónico que aumenta o reduce el valor de voltaje en corriente directa, al mismo tiempo que transfiere la potencia.

CPU	Unidad de procesador central.
CT	Siglas en inglés para transformador de corriente.
Demanda	Potencia máxima requerida de la red eléctrica en un momento dado.
Fase	Cada una de las ondas de corriente alterna para un servicio eléctrico y su conductor.
Patrón	En metrología, idea u objeto usado como referencia, para procesos de comparación y calibración de equipo u otros patrones.
PC	Siglas en inglés de computador personal.
PWM	Siglas en inglés de <i>Pulse Width Modulation</i> , Modulación de ancho de pulso.
SD	Siglas en inglés para <i>Secure Digital</i> , norma estandarizada en 1999 para tarjetas de memoria no volátil, utilizadas en cámaras digitales, teléfonos y otros dispositivos.
Transformador	Dispositivo eléctrico capaz de cambiar niveles de voltaje o corriente entre circuitos eléctricos, a la vez que los aísla y los desacopla.

Transformador de instrumento	Transformador que se usa en la medición de energía eléctrica.
Trifásico	Arquitectura de generadores eléctricos de tres ondas individuales de corriente alterna (fases), desplazadas en un ángulo de fase igual a $\pi/3$ respecto de la anterior. Por extensión, su sistema de distribución y servicios.
USB	Siglas en inglés de bus en serie universal, convención y diseño de puerto, en serie de conectividad de computadoras personales.
Vatio	Unidad de medida del Sistema Internacional para potencia.

RESUMEN

En las distribuidoras de energía se utilizan equipos de medición contruidos con transformadores de instrumento para reducir las magnitudes de voltaje y corriente en los circuitos primarios, adecuándolas para poder ser utilizadas por un medidor de energía. La exactitud y buen funcionamiento de esos transformadores es clave no solo para garantizar una correcta medición y facturación del consumo y demanda de los usuarios medidos en media tensión, en una distribuidora de energía, sino también para cumplir con las normas establecidas por el ente regulador de la generación y distribución de la energía eléctrica.

La importancia de contar con métodos y equipos certificados y confiables para pruebas y verificación del estado de funcionamiento y exactitud de los transformadores de instrumento es enorme, pues constituye la herramienta para proveer mantenimiento correctivo y preventivo a las unidades que conforman los equipos de medición. Los equipos con tecnologías anteriores conllevaban serias desventajas como difícil manejo y riesgo a la integridad física del operario, pues requerían inyección de voltajes y corrientes nominales cuyo manejo involucra el latente peligro de electrocución y destrucción de equipo.

El presente trabajo de graduación es un análisis de las ventajas que ofrecen los equipos de baja tensión y baja frecuencia, tales como portabilidad, eliminación del peligro de electrocución e integración de automatización de pruebas para transformadores de instrumento, entre otras.

OBJETIVOS

General

Realizar un análisis de ventajas técnico-económicas de equipo electrónico de baja tensión y baja frecuencia, para prueba de transformadores de instrumento en distribuidoras de energía eléctrica, en contraste con los equipos anteriores para este fin.

Específicos

1. Presentar los fundamentos teórico-técnicos de los transformadores de instrumento y su utilización en una distribuidora de energía.
2. Dar a conocer la metodología definida por normativa internacional para la prueba de transformadores de instrumento.
3. Mostrar las características generales de las clases de equipos para prueba de transformadores de instrumento.
4. Presentar una comparación técnico-económica entre los equipos electrónicos tradicionales y los electrónicos de baja tensión y baja frecuencia, para prueba de transformadores de instrumento.

INTRODUCCIÓN

En el presente trabajo de graduación se analizan y contrastan las características y ventajas técnicas y económicas de los equipos tradicionales y electrónicos de baja tensión y baja frecuencia, para pruebas de transformadores de instrumentos que conforman los equipos de medición utilizados en las distribuidoras de energía eléctrica.

En el primer capítulo se dan a conocer los conceptos fundamentales de los transformadores de instrumento, sus principios de funcionamiento, componentes, clasificación, construcción, tecnologías y uso en las distribuidoras de energía. En el segundo se muestra la normativa internacional para la metodología y los circuitos específicos más eficaces para efectuar pruebas en los transformadores de instrumento, tanto para los transformadores de corriente como para los de voltaje. El tercer capítulo corresponde a una descripción general que expone las características, prestaciones, funciones y alcances, tanto de los equipos tradicionales como de los equipos electrónicos de baja tensión y baja frecuencia, para pruebas de transformadores de instrumento.

Finalmente, en el capítulo cuarto se realiza el análisis por comparación de características y ventajas, tanto en detalles técnicos como factores económicos de los equipos tradicionales y electrónicos de baja tensión y frecuencia, para pruebas de transformadores de instrumento, incluyendo un análisis de costos y del retorno de la inversión sobre un equipo electrónico de baja tensión y baja frecuencia en concreto.

1. TRANSFORMADORES DE INSTRUMENTO

1.1. Diseño de transformadores de instrumento

Los transformadores de instrumento están diseñados para transformar voltaje o corriente de valores altos en sistemas de transmisión y distribución, a valores bajos que puedan ser utilizados por aparatos de medición con voltajes y corrientes de bajo valor, normalizados y manejables. Existen dos aplicaciones primarias en las cuales se usan los transformadores de instrumento:

- Medición (facturación de energía)
- Control de protección (protección de sistemas eléctricos)

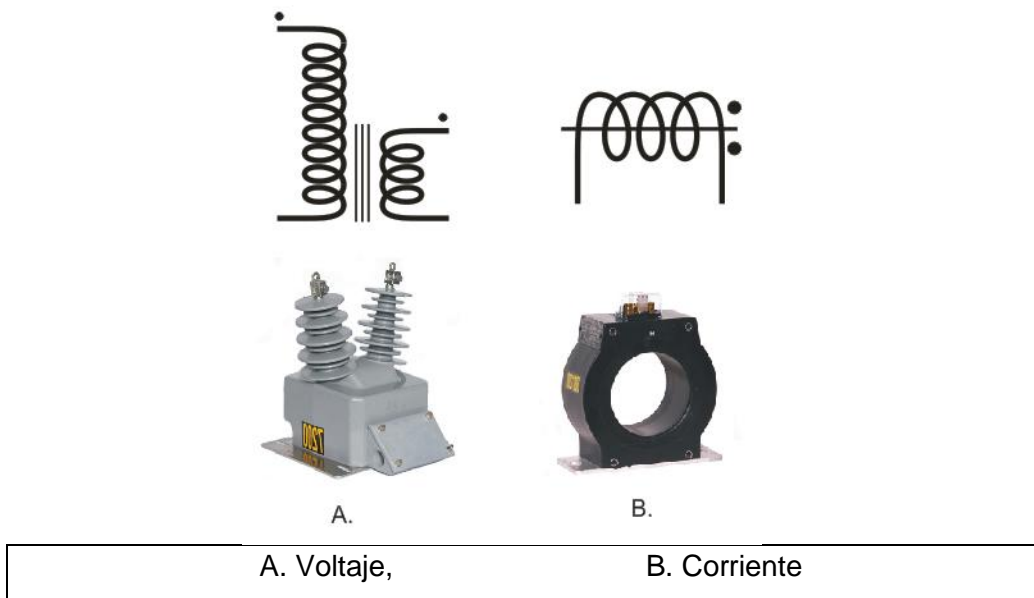
Generalmente, los transformadores de instrumentos de medición requieren de una alta precisión en el rango de operación normal de voltaje y corriente; en cambio, los utilizados para protección, requieren linealidad en un rango amplio de voltajes y corrientes.

Durante una perturbación, tal como una falla en el sistema o durante transitorios de voltaje, el voltaje de salida de los transformadores para instrumentos activará relevadores de protección, para iniciar una acción apropiada que pueda liberar y aislar la zona donde se presenta la perturbación, y por ende, proteger el resto del sistema de potencia.

Los niveles típicos de salida de los transformadores para instrumentos en norma ANSI son de 0 a 5 amperios para los de corriente, y de 115 a 120 voltios para los de voltaje.

En norma IEC pueden ser también de 0 a 1 amperio para los de corriente y los voltajes de 0 a $120/\sqrt{3}$; estos se pueden medir utilizando un instrumento adecuado, tal como un medidor de voltamperios.

Figura 1. Transformadores de instrumento y sus símbolos



Fuente: Technical Information and application guide ABB. p. 15.

1.1.1. Principios de funcionamiento

El principio de funcionamiento del transformador de instrumento es exactamente igual al de cualquier otro transformador eléctrico que está ligado al fenómeno de la inducción electromagnética; la Ley de Faraday-Lenz, expresada en términos de la fuerza electromotriz ε es:

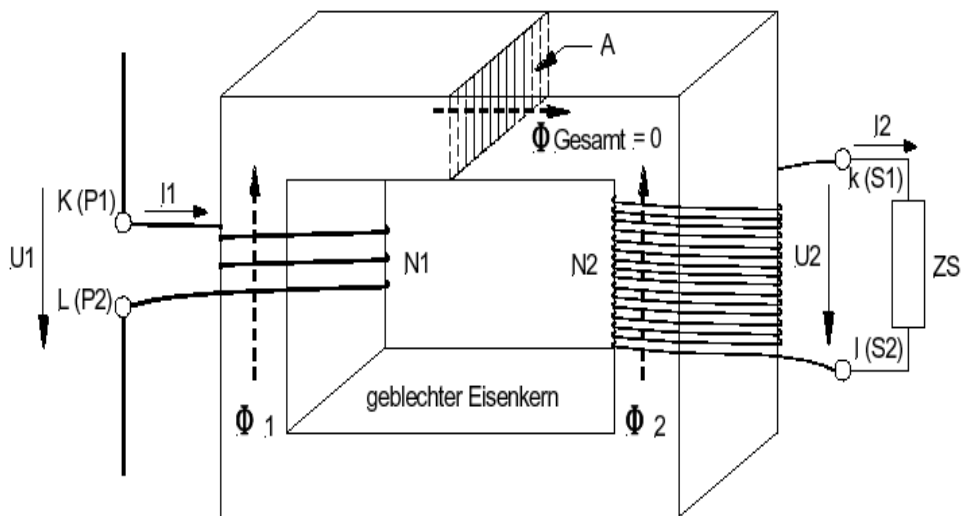
$$\varepsilon = \frac{-d\phi B}{dt}$$

En términos prácticos señala que para un circuito atravesado por un campo magnético variable en el tiempo, se tiene una fuerza electromotriz (potencial) proporcional a la magnitud de ese campo y su velocidad de cambio.

Es el mismo principio que rige a los generadores eléctricos, pero para el caso de los transformadores, esto se circunscribe a un circuito eléctrico (devanado) primario acoplado por flujo magnético a otro circuito secundario. Los voltajes, corrientes y número de espiras del primario y el secundario cumplen con la igualdad:

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{I_1}{I_2} = \frac{N_1}{N_2}$$

Figura 2. **El transformador**



Fuente: elaboración propia, con base en el contenido del curso de aplicación 2012 del CT Analyzer, Omicron 2012, impartido para el Departamento de Pérdida y Medida, Empresa Eléctrica de Guatemala, septiembre de 2013. Diapositiva 3.

En el caso de los transformadores de instrumento, sirve para desacoplar eléctricamente la red de media tensión de los circuitos de los equipos de medición, y reducir, a través de una relación de vueltas conocida y de muy grande exactitud, las magnitudes eléctricas de los sistemas de distribución, para poder usarlas en los medidores de energía.

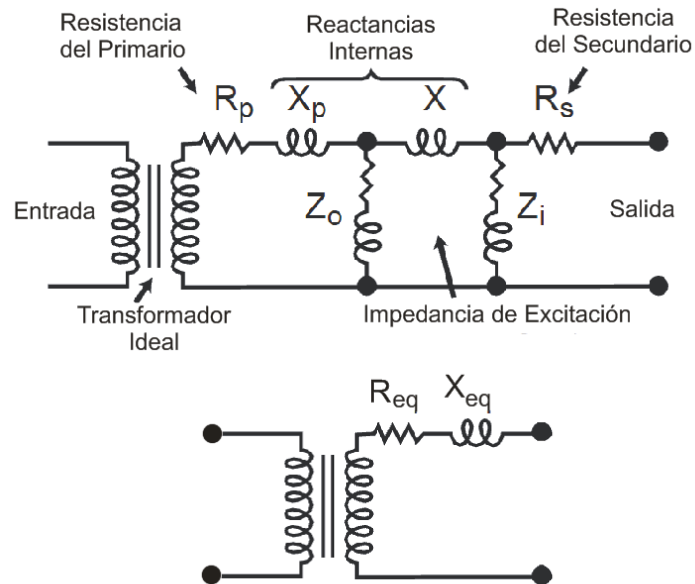
El modelo del transformador se encuentra resumido en el circuito equivalente de la figura 3; inicialmente se toma en consideración cada una de las características y fenómenos que se dan en el transformador, pérdidas por corrientes parásitas, resistencia de devanados, reactancias inherentes a los devanados y núcleos, dispersiones de flujo en primario y secundario, etc.

A pesar de que el modelo está descrito por un circuito relativamente complejo, el componente de la excitación, (malla Z_0 , X y Z_I) en la práctica, tiene una corriente muy pequeña comparada con la corriente de carga de los transformadores, que en condiciones normales, causa una caída de voltaje despreciable en R_p y X_p ; por lo que puede eliminarse.

También las resistencias de primario y secundario pueden sumarse en una, dando como resultado un circuito más simple que trabaja muy bien en la práctica.

En la siguiente figura se presentan los modelos completo y simplificado del transformador de instrumento, para analizar sus reactancias y resistencias.

Figura 3. **Modelos (completo y simplificado) del transformador de instrumento**



Fuente: CHAPMAN, Stephen. *Máquinas eléctricas*. p. 85.

1.1.2. Componentes de un transformador de instrumento

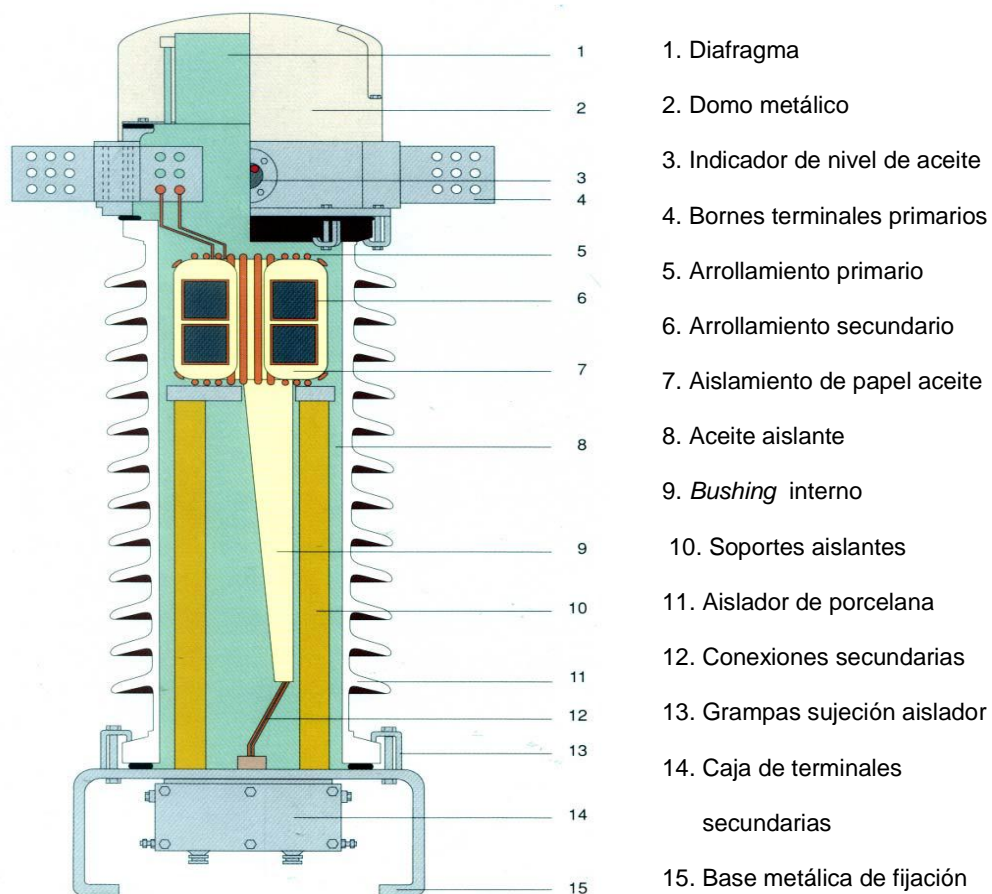
En general, tanto para transformadores de corriente como de voltaje, los componentes básicos son:

- Devanado primario: es el que recibe alimentación directamente de la fuente a medir; en el caso de los transformadores de voltaje es un arrollado de conductor de hilo de cobre electrolítico puro, relativamente delgado y constituido por miles de vueltas, y en el de los transformadores de corriente puede ser tan solo un puente conductor o barra sólida de cobre, o bien no tener ninguno de estos y que el conductor a medir sea lo que atraviesa su núcleo y funcione como arrollamiento primario.

- Devanado secundario: es el devanado que energiza los instrumentos de medición, está acoplado solo magnéticamente al devanado primario.
- Núcleo: es el componente que maximiza, concentra y dirige el campo magnético, de tal forma que asegura que el flujo magnético generado por uno de los arrollamientos sea recibido en su totalidad por el otro arrollado, y que no exista pérdida de flujo magnético que reduzca su eficiencia. Está construido con material ferromagnético; en el caso de los transformadores de instrumento, por lo general, se trata de aleaciones de acero de alta permeabilidad magnética, para conformar un marco rectangular o bien toroidal, construido no de una pieza sino de muchas láminas relativamente delgadas, aisladas eléctricamente entre sí para reducir el efecto de las corrientes parásitas que provocan pérdidas de flujo magnético y calor.
- Encapsulado: es la parte aislante externa del transformador, brinda un medio para una correcta y segura sujeción y anclaje, así como protección a devanados, aislamientos y núcleo; le da rigidez mecánica y también dieléctrica, pues su diseño exige que no se produzcan descargas ni arcos; en el caso de los de media y alta tensión, las formas incluyen frecuentemente emulación de discos aisladores para maximizar el camino dieléctrico superficial para tal cometido. Se han utilizado como materiales para el encapsulado, el caucho butílico, elastómeros como el poliuretano aromático, epóxicos, y finalmente los epóxicos cicloalifáticos hidrofóbicos, que han mostrado tener mayor durabilidad, resistencia a la degradación ultravioleta, polución química, erosión de superficie y rigidez dieléctrica.
- Terminales: los puntos de acoplamiento eléctrico constituyen también una parte crítica del transformador de instrumento, ya que en ellos pueden ocurrir pérdidas y destrucción por calentamiento; por lo general están

construidas de bronce recubierto de estaño, que al eliminar el problema de la corrosión galvánica por diferencia de electronegatividad, permite utilizar conductores de cobre y aluminio. La robustez de la terminal permite que puedan aplicarse torques de apriete grandes y asegurar un buen contacto eléctrico.

Figura 4. **Transformador de corriente CTA 145 serie Balteau de Alstom**



Fuente: <http://www.frlp.utn.edu.ar/materias/tydee/moduloii.pdf>.

Consulta: enero de 2014.

Figura 5. **Transformador de corriente seccionado**



Fuente: aporte del Ing. Julio González, Departamento de Medida, Empresa Eléctrica de Guatemala, y Ritz Instrument Transformers.

Figura 6. **Transformador de corriente para media tensión modelo KOR-11 de ABB, antes y después del encapsulado en poliuretano**



Fuente: ABB Instrument Transformers. *Instrument transformer Application and selection* revision A. ABB, VAP420001-PP. p. 21.

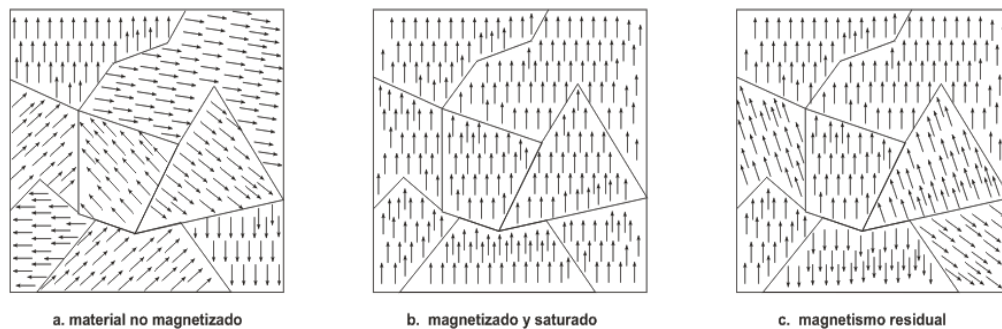
1.1.3. Proceso de magnetización

Como parte de la comprensión del fenómeno del magnetismo, un material ferromagnético puede concebirse didácticamente como un conjunto muy grande de unidades magnéticas y de polaridad magnética común, denominados dominios.

Cada dominio magnético constituye una entidad formada a su vez por dipolos magnéticos infinitesimales; se establece que, de forma natural, los dominios están ordenados aleatoriamente.

Al verse afectado el material por magnetismo externo, cierta cantidad de estos dipolos o dominios van a tender a alinearse con ese campo magnético, en proporción a la intensidad del mismo, entre más intenso el campo, más dominios se irán alineando. Al llegar al punto en que la totalidad de dominios magnéticos están ya alineados, el material alcanzará el estado de saturación magnética.

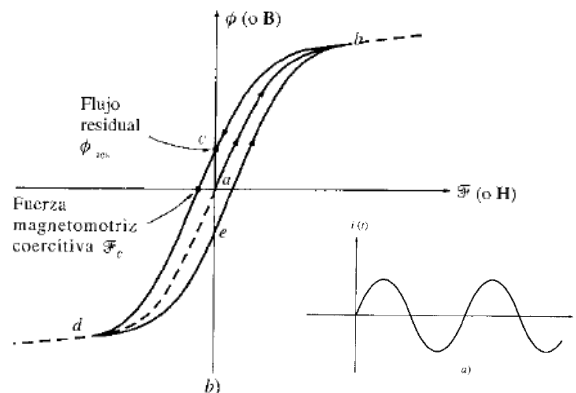
Figura 7. Dominios magnéticos y estados de magnetismo



Fuente: CHAPMAN, Stephen. *Máquinas eléctricas*. p. 28.

Si después de este estado, el campo magnético retorna a cero, la mayoría de dominios en el material volverán a desordenarse aleatoriamente, pero cierta porción permanecerá alineada, dejando parcialmente imantado el material y formando el magnetismo remanente en el material. Cuando un núcleo de transformador se somete a un campo magnético alternante, describe un comportamiento dictado por la curva de histéresis magnética:

Figura 8. **Lazo de histéresis trazado por el flujo de un núcleo ferromagnético ante una corriente alterna $i(t)$**



Fuente: CHAPMAN, Stephen. *Máquinas eléctricas*. p. 27.

Puede notarse que al comienzo (punto a), con el material sin magnetismo aplicado, el flujo magnético, al igual que el campo aplicado, es cero.

Con el aumento del campo, el flujo va aumentando según la curva hasta llegar al punto de saturación (b), y cuando el campo magnético vuelve paulatinamente hasta cero, el flujo tiene un comportamiento diferente, ya que no vuelve a cero sino que tiene un componente fijo adicional llamado magnetismo remanente que, como puede verse, se mantiene en igual magnitud; sólo cambia de sentido cuando la polaridad del campo se invierte.

Este fenómeno, obliga a que, al diseñar un transformador de instrumento, debe dimensionarse para que nunca llegue al punto de saturación (ni siquiera trabajando dentro de la zona de corriente nominal), ya que la función se alejaría de la linealidad y la relación de transformación especificada variaría, dando valores erróneos de lectura.

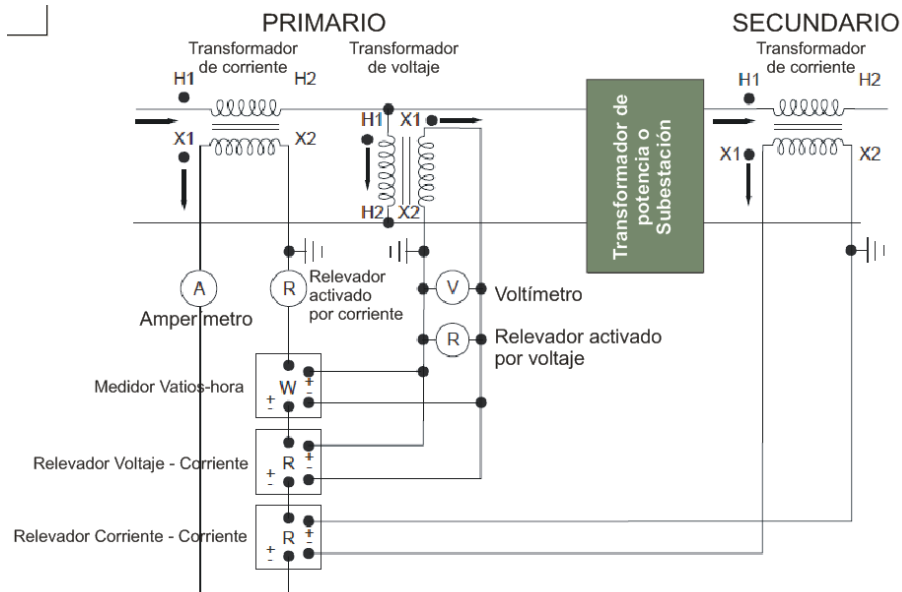
1.1.4. Clasificación de los transformadores de instrumento

Dada la diversidad de usos y construcciones, existen varios criterios para la clasificación de los transformadores de instrumento.

- Por finalidad de utilización: bajo este criterio, pueden identificarse dos usos de transformadores de instrumento:
 - Transformadores de instrumento para protección: la función de estos es accionar dispositivos como parte del sistema para protección de un circuito determinado. Deben conservar su precisión hasta veinte veces la magnitud de la corriente nominal, y en redes con altas corrientes hasta treinta veces.
 - Transformadores de instrumento para medición: la función de estos es desacoplar eléctricamente la red de media tensión y altas corrientes de los circuitos de los equipos de medición y reducir, a través de una relación conocida de vueltas y de muy grande exactitud, las magnitudes eléctricas de dichos circuitos y poder usarlas en los medidores de energía.
 - Transformadores mixtos o combinados. en este caso, los transformadores se diseñan para una combinación de las dos

finalidades anteriores, un circuito con el núcleo de alta precisión para los circuitos de medición y uno o dos circuitos más, con sus núcleos adecuados, para los circuitos de protección. Un transformador de corriente de medición sí debe saturarse a cierta corriente primaria para proteger los dispositivos conectados en su lado secundario, mientras que un transformador de corriente de protección no debe saturarse con la corriente primaria nominal especificada, para poder transferir la corriente de falla correctamente. La exactitud de los transformadores de medición es mucho mejor que los de protección, ya que se emplean para facturación.

Figura 9. **Esquema conceptual de conexión de transformadores de voltaje y de corriente, para medición y protección**



Fuente: ABB Instrument Transformers. Technical Information and Application Guide 1VAP420003-TG. p. 29.

- Por localización de la instalación: bajo esta clasificación pueden existir transformadores de uso interior y exterior. Los transformadores para exterior deben cumplir con exigentes especificaciones de materiales en cuanto a aislamiento, durabilidad, resistencia a contaminación, radiación ultravioleta, calor extremo, humedad, resistencia mecánica, etc., y tienden a ser de mayores dimensiones físicas que los transformadores para interior, los cuales se prefieren de menores dimensiones físicas, por estar diseñados para instalarse dentro de gabinetes o armarios, y tienen especificaciones menos exigentes de aislamiento que los de exterior.

Figura 10. **Unidades de TI diversas para interior/exterior**



Fuente: <http://www.abb.com/mediumvoltage>. Consulta: marzo de 2014.

- Por magnitud eléctrica a medir: pueden clasificarse en dos grandes grupos: transformadores de voltaje y de corriente.
 - En los de voltaje, el devanado primario consta de miles de espiras, fuertemente acopladas de forma magnética, con su devanado secundario hecho con cientos de espiras; las relaciones de vueltas suelen ser de 20:1, 60:1, 70:1 o 120:1 para medias tensiones y de 600:1 o 350:1 para altas tensiones, de tal manera que las reducen a valores convencionales de operación para medidores de energía.
 - Un transformador de corriente difiere de uno de voltaje en que sus devanados están *débilmente acoplados*. El flujo a través del núcleo es menor que el flujo disperso entre devanados; esta arquitectura es ideal para reducir los valores de altas corrientes con una sola espira como devanado primario junto con devanados que van desde una hasta algunos cientos de espiras (5:5 hasta 1000:5) tal que en su máxima capacidad reduzcan la corriente al estándar de operación para medidores de energía (5 A)
- Por construcción (arrollado, ventana, barra): existen muy diversas formas de los transformadores de instrumento, pero puede diferenciarse dos grandes clases: los arrollados y los de ventana. Los arrollados abarcan la gran mayoría de transformadores, siendo constituidos por núcleos de acero ferromagnético, con sus respectivos arrollados primario y secundario, ambos encapsulados para formar una sola pieza de equipo. Por lo general todos los transformadores de voltaje son de esta forma, y también muchos de los de corriente. Los de ventana no tienen devanado primario, más bien este lo constituye el conductor a medir, que ha de atravesar dicha ventana que es el interior del conjunto núcleo y devanado

secundario. Finalmente, los de barra, son los de ventana con una barra equipada con terminales montada en su interior.

- Por nivel de tensión: por el nivel de tensión de funcionamiento, pueden dividirse en baja, media y alta tensión.
 - En baja tensión (hasta 480 V) no se utilizan transformadores de potencial, ya que la medición de voltaje puede ser directa. En la práctica, los transformadores de corriente en baja tensión se utilizan solamente si las demandas de potencia sobrepasan los 70 kW.
 - En media tensión, (hasta 34,5 kV) se utilizan transformadores con construcción especial que incluye encapsulados de materiales aislantes de alto desempeño sobre todo con las unidades expuestas a la intemperie y formas geométricas con discos aisladores que minimizan la probabilidad de arco.
 - En alta tensión, las unidades suelen ser mucho más grandes y complejas, con diseños sumergidos en aceite dieléctrico para refrigeración y aislamiento interno, y al buscar la conveniencia de que una sola pieza de equipo integre medición de corriente y potencial, es común que sean dos en uno, aparte de ofrecer múltiples relaciones de transformación.

Figura 11. **Unidades de medición Trench de 69 kV en subestación**



Fuente: departamento de medida, Empresa Eléctrica de Guatemala.

- Por material de encapsulado externo: a lo largo de la historia han sobresalido los siguientes:
 - Caucho butílico: en la década de 1970 comenzó a utilizarse el caucho butílico para unidades de media tensión. Como producto terminado presenta excelente aislamiento, pero para el fabricante es complicado y costoso su manejo en el moldeo de precisión, por las altas presiones y temperaturas requeridas. No obstante, en la actualidad sigue utilizándose en algunos productos.
 - Poliuretano: los poliuretanos aromáticos son polímeros elásticos de la familia del caucho, permiten facilidad de manejo y precisión al moldeo por inyección, dando como resultado exactitud y uniformidad en las superficies, así como una gran resistencia de adhesión al punto que, frecuentemente, supera la resistencia mecánica del polímero.

- Epóxicos cicloalifáticos: en la década de 1970 se comenzaron a utilizar epóxicos cicloalifáticos y resinas con características dieléctricas y de resistencia a polución ambiental, idóneas para encapsulados; sin embargo no se logró entonces proveerle suficiente resistencia mecánica y flexibilidad, hasta que a principios de los 2,000 se presentó una versión hidrofóbica mejorada de estos epóxicos, (HCEP del inglés *Hydrophobic Cycloaliphatic Epoxy*) dando un material con una sinergia de características que lo hizo más noble que los anteriores por su resistencia a la corrosión química, a la vez que su hidrofobia reducía la probabilidad de arcos por superficies húmedas, extendiendo la vida útil del encapsulado.

Figura 12. **Encapsulados diversos, caucho butílico, poliuretano y HCEP**



Fuente: <http://www.abb.com/mediumvoltage>. Consulta: febrero de 2014.

2. VERIFICACIÓN DE TRANSFORMADORES DE INSTRUMENTO DE ACUERDO CON LA NORMATIVA INTERNACIONAL

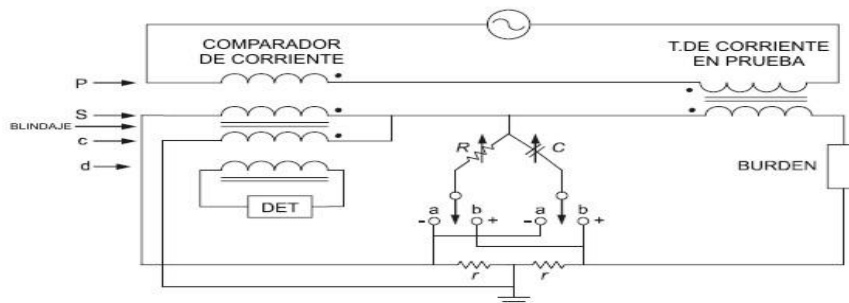
2.1. Circuitos típicos para prueba y calibración de transformadores de instrumento, según normativa internacional

A continuación se describen los diversos circuitos típicos para pruebas de calibración y los diversos métodos.

2.1.1. Método para transformadores de corriente

- Método del comparador de corriente (nulo comparativo): este método se describe en los requerimientos para transformadores de instrumento, de la norma IEEE C57.13-2008-a, define el siguiente proceso para prueba de exactitud de transformadores de corriente.

Figura 13. Prueba de exactitud en transformadores de corriente por comparador de corrientes compensado (nulo comparativo)



Fuente: IEEE C57.13-2008. *Requerimientos para transformadores de instrumento*. p. 36.

Este método, es capaz de dar una incertidumbre de medición de una a veinte partes por millón, en relación con las vueltas y el ángulo de fase, dependiendo de la magnitud de las diferencias a medir. El comparador de corriente funge como un transformador patrón cuya salida se compara con la del transformador bajo prueba, mientras que un circuito paralelo conduce la corriente de diferencia entre las dos salidas.

El comparador de corriente utilizado en este circuito, llamado con frecuencia comparador compensado, es básicamente un transformador de corriente construido con un núcleo toroidal de alta permeabilidad con un devanado de detección (d) uniformemente distribuido, que muestrea el flujo magnético en el núcleo del transformador e indica su estado cero con un detector conectado al mismo. Cuenta con un blindaje electrostático y devanado de compensación (c), anidado con un final blindaje magnético. Este blindaje trabaja como un segundo núcleo magnético; con los devanados forma un transformador de corriente que se convierte en la primera fase de una red electromagnética de dos fases con capacidad de transferencia de potencia.

El devanado de compensación, localizado dentro del blindaje, tiene el mismo número de vueltas que el devanado secundario, y conduce la corriente de error en la primera fase del circuito.

Por todo lo anterior, la sumatoria de vueltas-amperio aplicada al núcleo siempre será cero, y el detector indicará cero. Esta combinación de secundario agrega un *burden* prácticamente nulo. Con el devanado secundario del transformador conectado y su primario en serie con el del comparador, el balance amperio-vuelta se mantiene si el transformador bajo prueba tiene error cero; de lo contrario la corriente de error entrará al comparador y rompe el balance.

El circuito RC, dispuesto para conducir la diferencia en corriente (inyectado por medio de un pequeño voltaje disponible de uno o ambos resistores) se ajusta para restituir el balance. Bajo estas condiciones, el error del transformador de corriente está dado por:

$$\epsilon = \pm (r/R + j\omega rC)$$

Donde el término real es igual al error de relación de vueltas (r/R), y el término imaginario $j\omega rC$ iguala el error de ángulo de fase.

Si el comparador muestra error, debe ser sumado a la ecuación, sin embargo su diseño permite que se detecten errores menores a 1 ppm. La conexión selectiva del circuito RC a los puntos a o b permite medición de errores de relación de vueltas y de ángulo de fase tanto positivos como negativos.

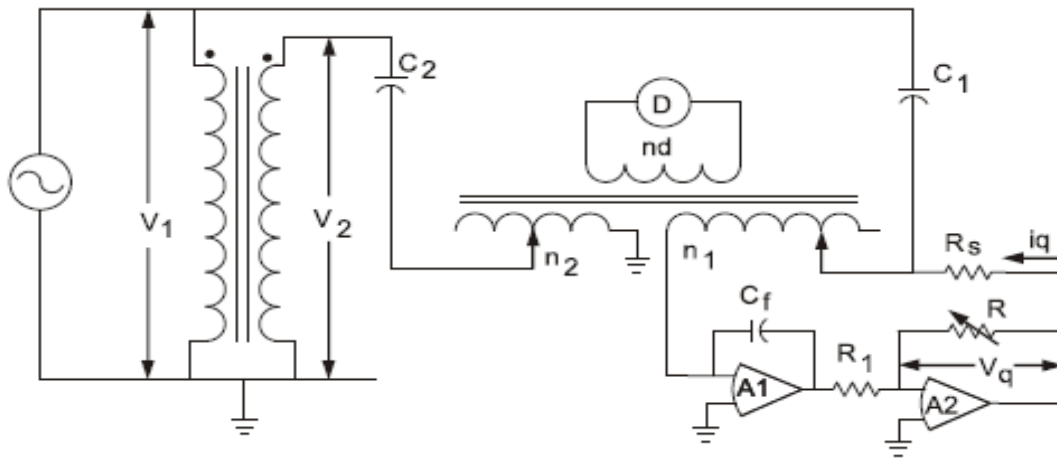
2.1.2. Método para transformadores de voltaje

El método de relación de capacitancias y comparador de corriente ha sido usado con una incertidumbre mínima de 20 ppm, hasta 325 kV; una ventaja del método es que el circuito puede ser usado para medir la relación de los dos capacitores principales en el momento de la calibración del transformador.

Los capacitores de baja pérdida C1 y C2 acomodan los respectivos voltajes de los devanados primario y secundario, conectados en polaridad substractiva. El comparador de corriente se muestra como un núcleo magnético individual con tres devanados, el n_2 es ajustable en pasos burdos y sirve de multiplicador, mientras n_1 proporciona el ajuste fino para el balance de relación final.

Los amplificadores operacionales A1 y A2, a través del potenciómetro R , producen un voltaje V_q proporcional y en fase con V_1 , V_q inyecta una corriente I_q , proporcional a R/n_1 , para poder hacer balance de cuadratura.

Figura 14. **Circuito para prueba de exactitud en transformador de voltaje, método de relación de capacitancias y comparador**



Fuente: IEEE C57. *Requerimientos para transformadores de instrumento*. p. 42.

El balance amperio-vuelta está indicado por el detector de nulo, D conectado al devanado sensor nd . Las ecuaciones de balance para la relación y ángulo de fase son:

$$N_x = V_1/V_2 = (C_2 \times n_2)/(C_1 \times n_1)$$

$$Y_x = (R/R_1)(\omega \times R_s \times C_f) \text{ [en radianes]}$$

Pueden escogerse valores de C_f y R_s tales que la constante $\omega R_s C_f$ permita que la lectura de Y_x sea directa en radianes a 60 Hz.

3. CLASES DE EQUIPOS PARA PRUEBAS DE TRANSFORMADORES DE INSTRUMENTO

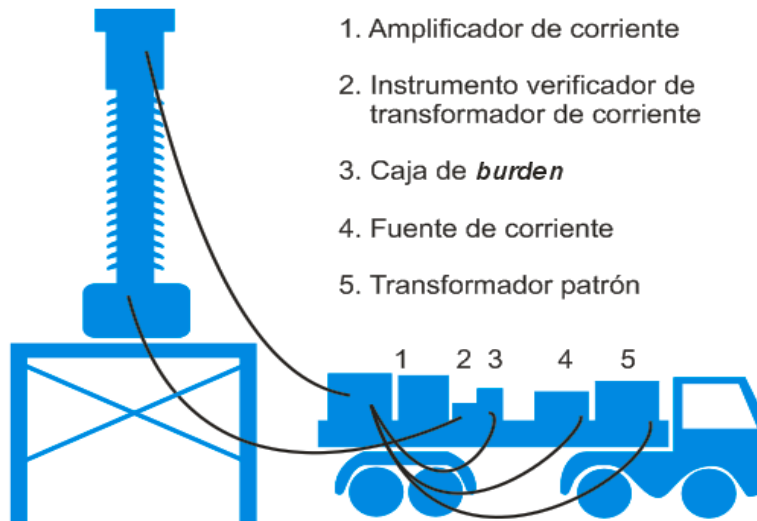
3.1. Equipos de inyección de corriente en primario a escala de valor nominal

Estos equipos son en realidad conjuntos de dispositivos individuales fabricados con el propósito de probar transformadores de instrumento en laboratorios especializados (fuente de corriente, amplificador de corriente, transformador de instrumento de corriente patrón, caja de *burden* y cables) muchas veces transportados en una plataforma hacia el sitio donde se requieren las pruebas para los transformadores de instrumento, frecuentemente subestaciones o puntos de intercambio eléctrico.

Las normas IEEE C57.13-2008-a definen valores de prueba de corrientes nominales, lo que implica que se manejen corrientes y voltajes muy elevados para reproducir condiciones de trabajo de dichas unidades y efectuar las pruebas. Normalmente, el conjunto de piezas de equipo supera las 2 toneladas, incluyendo el transporte en plataformas y camiones con remolque, extensos y pesados cables y también varias personas a cargo para efectuar las conexiones, coordinar la prueba, montaje y desmontaje de los equipos. Suelen manejar gran exactitud.

Entre sus desventajas más grandes cuentan los altos voltajes y corrientes que se constituyen en un peligro para el personal, el volumen y peso de cada pieza de equipo, los altos costos de transporte y almacenaje. Las figuras 15 y 16 ilustran esta configuración.

Figura 15. **Esquema de prueba para transformador de instrumento con inyección de corrientes a escala nominal en subestación**



Fuente: https://www.omicron.at/fileadmin/user_upload/pdf/literature/CT-Analyzer-Brochure-ENU.pdf. Consulta 4 de junio de 2014.

La fuente de corriente (4) y el amplificador (1) alimentan un circuito primario, cuyo conductor atraviesa el transformador patrón de ventana/comparador compensado, y el secundario del transformador alimentan la caja de *burden* y el instrumento verificador del transformador, en este caso puede ser el mismo patrón, ya que viene equipado con comparador, mide tanto el primario y el secundario. El circuito es el mismo ilustrado en la figura 13.

Los valores con que se debe probar son los nominales para el transformador. Por ejemplo, con un transformador de corriente de relación 1000:5, deben utilizarse 1000 A de corriente en el lado primario. Los equipos logran esto haciendo circular corrientes de ese orden pero a voltajes sumamente bajos (del orden del 0.1 voltio), y durante periodos muy cortos, suficientes como para muestreo electrónico y comparación de las corrientes en primario y secundario.

Figura 16. Vistas del montaje de equipo para prueba de transformadores de instrumento con inyección de corriente a escala nominal en subestación



Fuente: Omicron electronics GmbH. CT Analyzer. A New Approach for CT Testing and Analysis. p. 57.

Un ejemplo de uno de los componentes de este conjunto de prueba es el comparador de corriente Tettex 4764, de Haefely Instruments, que brinda un medio para comparar la corriente primaria de entrada para un transformador de corriente con su corriente en el secundario, tal como lo define la norma IEEE C57.13-2008-a, acorde al método de comparador de corrientes compensado, dando una medida directa de la exactitud de relación del mismo, así como el ángulo de fase.

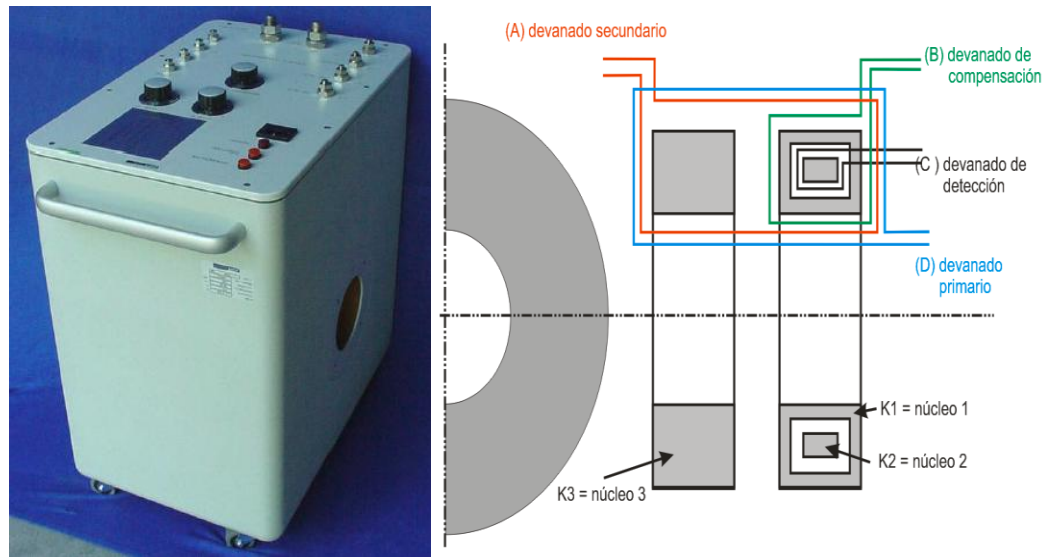
Tabla I. **Características del comparador de corriente Tettex 4764**

Cumple normas IEC, VDE, ANSI	
Exactitud: relación de CT: $\pm 0,001 \%$ min	Ángulo de fase: $\pm 0,05$
Frecuencia: 47 ... 62 Hz	
Conexión primaria: corriente primaria nominal 5 a 500 A y 500 a 5000 A, con doble vuelta del primario (agujero de 130 mm al costado)	
Conexión primaria: 1 a 5 A	
Potencia máxima de salida: 5VA	
Alimentación: 115/230 V, 50/60Hz,20VA	
Dimensiones: 715 x 515 x 790 mm (28,2 x 20,3 x31,1in)	
Peso: 117 kg (257,4 lb)	

Fuente: http://www.haefely.com/pdf/LL_4761-4764_0711_KH.pdf. Consulta: febrero de 2014.

Como lo evidencia la tabla de datos, es un equipo de exactitud muy grande, dado el diseño de su circuito que, según norma IEEE C57.13-2008-a, puede alcanzar valores de error tan pequeños como una parte por millón, incluye devanado de detección y de compensación, y blindaje magnético, por ende, posee dimensiones y peso que limitan significativamente su portabilidad, además del peligro que representa utilizar valores nominales de corriente en primario.

Figura 17. **Comparador 4764 de Tettex Instruments y el diseño de sus devanados**



Fuente: http://www.haefely.com/pdf/LL_4761-4764_0711_KH.pdf. Consulta: febrero de 2014.

Otra prueba que ejemplifica uso de equipo que opera a valores nominales puede apreciarse en la figura 18, que muestra el montaje de una prueba para la determinación de la curva de magnetización de transformadores de instrumento de corriente para protección.

En esta se hace circular una alta corriente por una barra, cuyo incremento lineal es medido por los transformadores de protección, con el fin de obtener la curva de magnetización de dichos equipos, un transformador de 10 kV es auxiliar para poder obtener las altas corrientes en la barra.

Figura 18. **Prueba de determinación de curva de magnetización con corrientes nominales**



Fuente: Omicron electronics GmbH. *CT. Analyzer: A New Approach for CT Testing and Analysis*. p. 55.

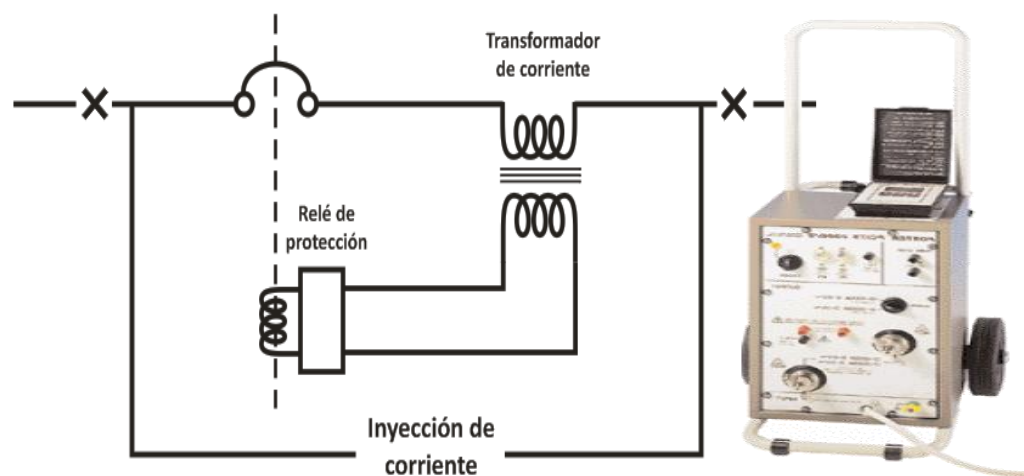
3.2. Equipos de inyección de corriente en primario

Los equipos de inyección de corriente en primario tienen como aplicación principal la prueba conjunta de los transformadores de corriente y el circuito completo de protección que comprende conductores, relé de protección y cortacircuitos; prueba que suele realizarse en el momento previo a la entrega y puesta en operación del circuito, o bien después de una reparación.

Usualmente se requieren altas corrientes (más de 500 A), para reproducir la condición de falla o sobrecorriente que disparará el sistema.

Como ejemplo se puede citar el sistema PCITS2000/2 de Megger, que proporciona una salida para pruebas de 20 a 2000 A (0 a 3 V) 50/60 Hz en incrementos de 10 A, posee controlador equipado con medición, (resolución de 1 A) y temporizador (resolución de 0,01s) para determinar el tiempo de disparo de la protección; el conjunto tiene dimensiones de 202 mm x 127 mm x 55 mm y un peso de 61 kg.

Figura 19. **Circuito de prueba típico para inyección de corriente en primario y equipo PCITS2000/2 de Megger**



Fuente: <http://www.nahanagan.com/downloads/PCITS2000-2.pdf>. Consulta: 15 de junio de 2014.

Otro equipo de prueba similar, pero más simple y orientado a pruebas de todo tipo de transformadores de instrumento de corriente y seccionadores de subestación es el Ingvar, también del fabricante Megger, que en resumen es una fuente de corriente controlada que proporciona de 700 a 3000 A (2,6 a 2,0V) corriente alterna, consta de dos unidades, la unidad de control (546 x 347 x 247 mm) y la de corriente (410 x 340 x 205 mm), cada una con un peso de 20 kg, en total pesa 40 kg. 410 x 340 x 205 mm.

Figura 20. **Sistema de prueba de inyección de corriente en primario
Ingvar de Megger**



Fuente: http://www.maxicont.hu/doc/termekek/Ingvar_eng.pdf. Consulta: 15 de junio de 2014.

3.3. Equipos de baja tensión/baja frecuencia

Estos equipos han sido concebidos tomando en cuenta los modelos matemáticos y de circuito de los transformadores de instrumento. Se estudiarán las características del CT Analyzer, de Omicron Electronics GmbH, Austria, por ser el equipo más completo en su clase hasta el momento. Está concebido para efectuar prueba y calibración automática de transformadores de corriente con bajo flujo de dispersión, (es decir, transformadores de corriente con núcleos no separados) tanto en laboratorios como en instalaciones eléctricas. Puede realizar las siguientes pruebas:

- Medición de relación para transformadores de voltaje.

- Medición de relación y ángulo de fase para transformadores de corriente, considerando *burden* nominal y *burden* secundario conectado.
- Revisión de la fase y polaridad del transformador de corriente.
- Medición de resistencia de devanados primario y secundario.
- Despliegue de la curva de excitación (saturada y no saturada).
- Registro de característica de saturación.
- Comparación directa de la curva de excitación a una curva de referencia.
- Evaluación y generación de reportes automáticos en hojas electrónicas, formato texto y Microsoft Office Excel, según IEEE C57.13 o IEC 60044-1, IEC 61869-2 para clase de exactitud $\geq 0,3$.
- Desmagnetización automática del transformador después de la prueba.

Especificaciones y datos técnicos:

- Eléctricos de prueba:
 - Voltaje de salida de 0 a 120 VAC
 - Corriente de salida 0 a 5 A (15 A valor pico)
 - Potencia de salida 0 a 400 VA (1500 VA valor pico)
- Exactitudes:
 - Para prueba de relación de transformadores de corriente:
 - Relaciones de 1 – 2000: 0,02 % (valor típico) / 0,05 % (valor garantizado).
 - Relaciones de 2000 – 5000: 0,03 % (valor típico) / 0,1 % (valor garantizado).
 - Relaciones de 5000 – 10000: 0,05 % (valor típico) / 0,2 % (valor garantizado).

- Para medición de desplazamiento de fase:
 - Resolución: 0,1 min
 - Exactitud: 1 min (valor típico) / 3 min (valor garantizado)

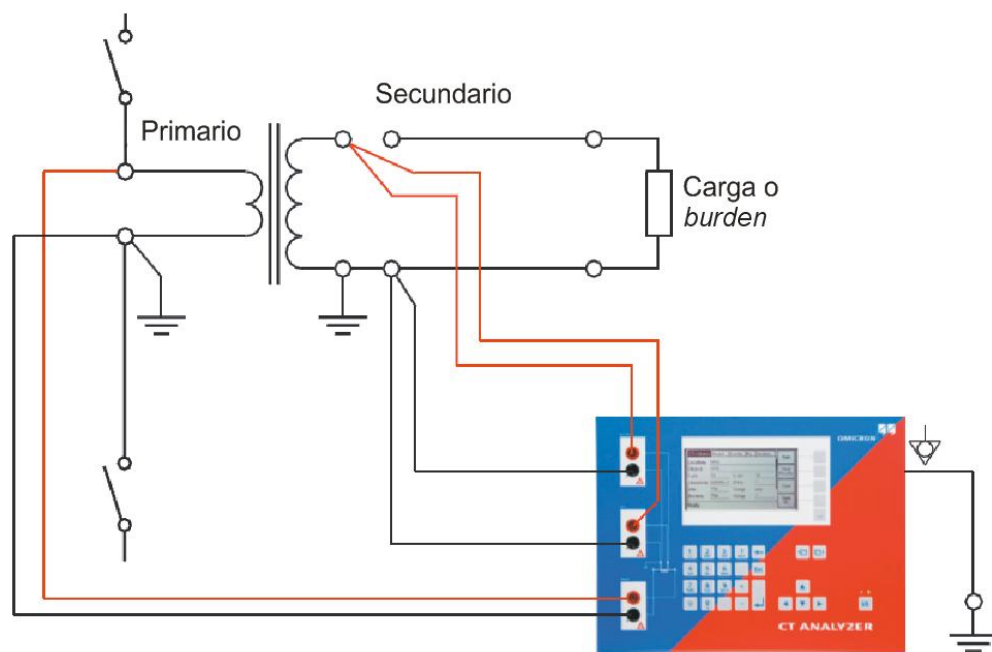
- Para medición de resistencia de devanados:
 - Resolución: 1 mΩ
 - Exactitud: 0,05 % (valor típico) / 0,1 % + 1 mΩ (valor garantizado)

- Físicas:
 - Dimensiones: 360 x 285 x 145 mm
 - Peso: 7,9 kg / 17,4 lbs.

- Características adicionales:
 - Tiempo corto de pruebas en automático (menos de un minuto).
 - Función de “averiguación de placa de datos automática”, para unidades sin placa de datos.
 - Alto nivel de seguridad utilizando método patentado de baja frecuencia variable y baja tensión (120 v máx.).
 - Excelente inmunidad a ruido para perturbaciones provenientes de líneas energizadas cercanas a la medición.
 - Interfaz de “control remoto”, que permite controlar y descargar datos desde y hacia al equipo a través de una computadora personal.

Existen 3 configuraciones principales de prueba posibles con el equipo. La primera y principal es la prueba de transformadores de corriente, diagramada en la figura 21, en donde es necesario separar eléctricamente el transformador (abrir) de la red existente para realizar la serie de pruebas listada anteriormente.

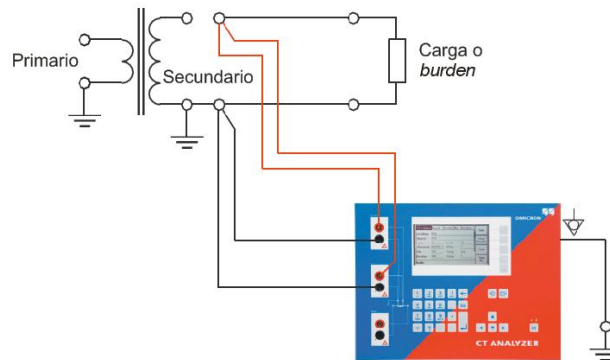
Figura 21. **Conexión del CT Analyzer para una prueba de transformador de corriente**



Fuente: OMICRON electronics GmbH 2012. *Manual de usuario.*
CTAnalyzerUM.SP.3. p. 27.

La segunda configuración se utiliza para conocer el valor de la carga conectada al secundario del transformador de corriente (*burden*) en una instalación dada. Es necesario desconectar esta carga del devanado secundario del transformador para determinarla correctamente.

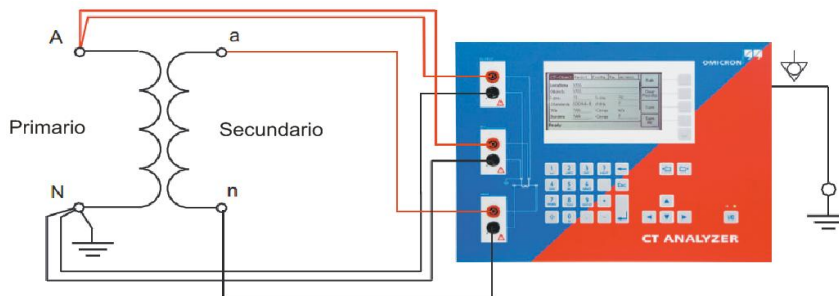
Figura 22. **Conexión del CT Analyzer para una prueba de carga o *burden* conectado a un transformador de corriente**



Fuente: OMICRON electronics GmbH 2012. *Manual de usuario.*
CTAnalyzerUM.SP.3. p. 28.

Finalmente, la tercera configuración sirve para comprobar la exactitud de la relación de transformación en un transformador de instrumento de voltaje, que es el único parámetro de prueba disponible en esta configuración.

Figura 23. **Conexión del CT Analyzer para una prueba de relación de vueltas en un transformador de voltaje**



Fuente: OMICRON electronics GmbH 2012. *Manual de usuario.*
CTAnalyzerUM.SP.3. p. 40.

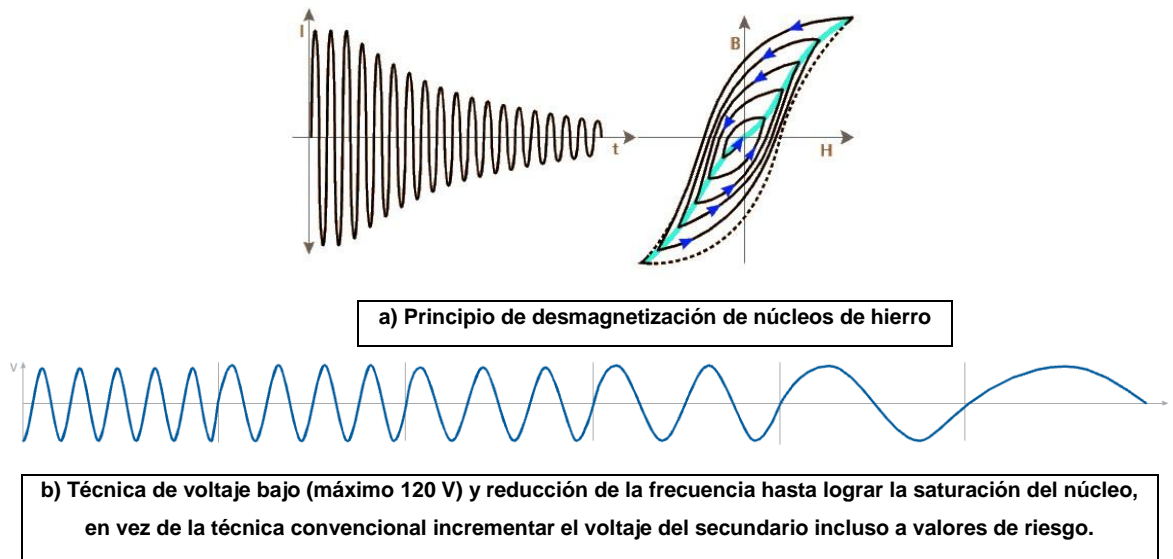
Contrario a los equipos estudiados en numerales anteriores, el CT Analyzer no utiliza valores nominales para las pruebas, porque genera valores bajos de voltaje (máximo de 120 V), corriente y frecuencia para las mismas.

Los transformadores de corriente, tal como se describen en el capítulo 1, poseen devanados de débil acoplamiento magnético; esto se traduce en valores proporcionalmente bajos de corriente en el secundario para altas corrientes en el primario. Al mismo tiempo, si se induce un voltaje bajo en el devanado secundario, se obtendrá un voltaje sumamente bajo en el lado primario, pero proporcional a aquel del secundario, según la relación de vueltas y reflejando fielmente la exactitud y precisión del transformador de instrumento.

Esta es la característica que aprovecha el diseño del CT Analyzer que marca la diferencia con el resto de equipos de diseño anterior y que permite que sea tan compacto y liviano y que pueda operar con valores muy por debajo de niveles peligrosos.

Para operaciones como la prueba de saturación de los transformadores de instrumento, utiliza siempre valores bajos de voltaje en el secundario, y para compensar la energía requerida, utiliza frecuencias debajo de 50 o 60 Hz; al visualizar este cambio desde el análisis de transformada, se comprueba incremento del área bajo la curva (energía) de la señal de corriente y por ende de la onda de magnetización que satura el núcleo y lo desmagnetiza en pasos graduales controlados para garantizar el retorno a cero de cualquier magnetización residual del núcleo que pudiera incidir en la exactitud del transformador de instrumento, como lo diagrama la figura siguiente.

Figura 24. **Técnicas de saturación y desmagnetización de CT Analyzer**



Fuente: https://www.omicron.at/fileadmin/user_upload/pdf/magazine/CT_Analyzer_Hot_on_the_trail_of_residual_magnetism_2010_issue2.pdf
CT_Analyzer_Time-saving_and_extremely_precise_2012_issue1.pdf. Consulta: abril de 2014.

El diagrama de bloques de la figura 25 describe un sistema que comienza con una fuente conmutada controlada electrónicamente de dos etapas, un convertidor AC/DC que provee una tensión regulada de 360 VDC, y un convertidor DC/DC que suministra 120 VDC regulados con una potencia máxima de 400 W, disponibles para la señal que alimenta los transformadores de prueba. Las entradas de señal son etapas individuales (“PRIM” una para la sección primaria y otra “SEC” para la secundaria del transformador de instrumento) que constan de filtro de compatibilidad electromagnética, una etapa de amplificador de ganancia controlada construida con amplificadores operacionales y un convertidor análogo-digital.

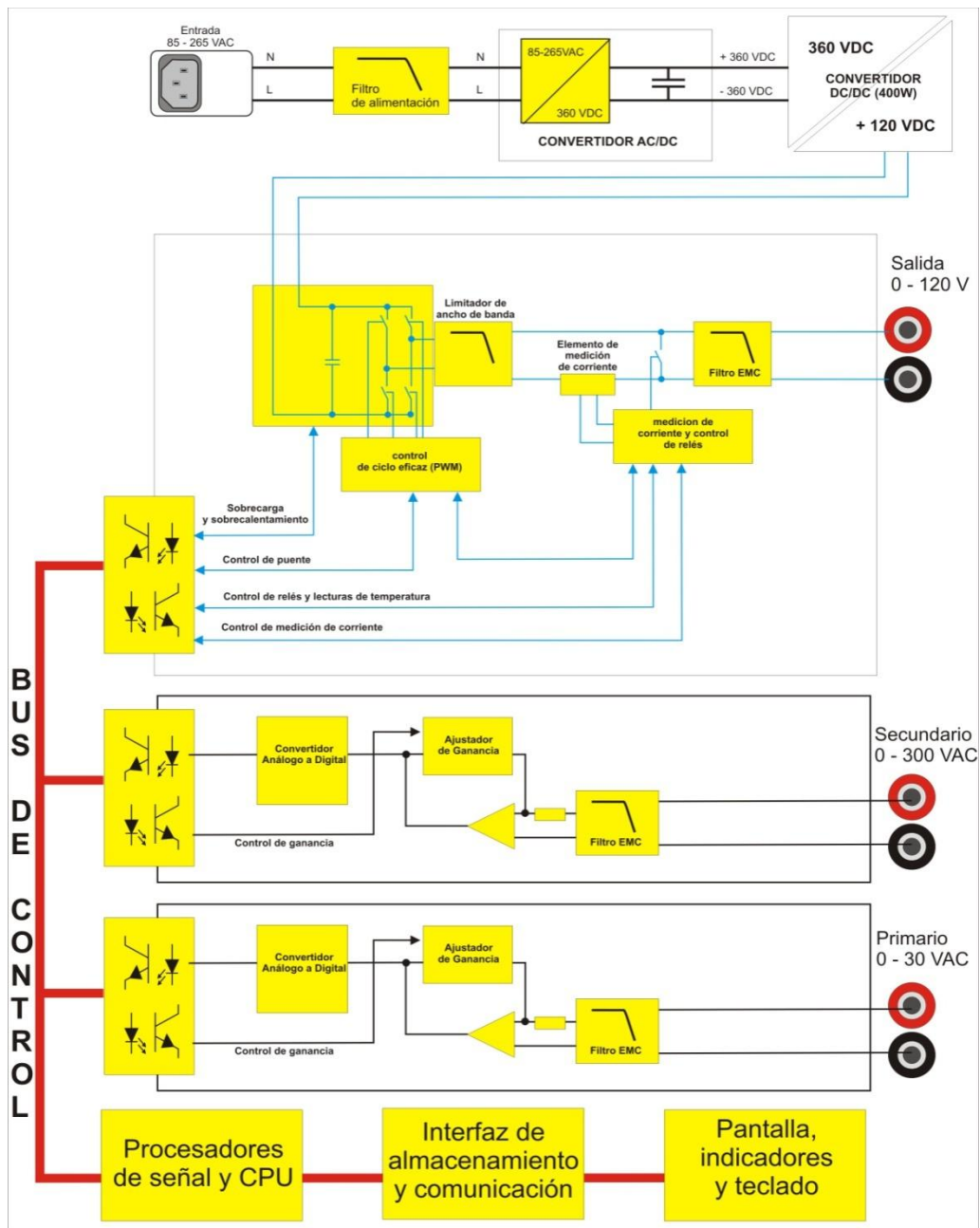
Todas las interfaces con el bus de control (entradas y salidas de cada etapa) son optoelectrónicas y de muy grande exactitud, proporcionan el nivel de aislamiento requerido de la electrónica de control (CPU) respecto de las secciones que manejan señales grandes. Adicionalmente, se dispone señales de control de temperatura, sobrecarga y cortocircuito.

El control de la salida lo ejecuta la conmutación controlada por la unidad central de proceso a través de un control de modulación de ancho de pulso (PWM por sus siglas en inglés), que modula el ancho de los pulsos de un tren, y pulsos de una onda cuadrada de 120 Vpp, para entregar el equivalente a una onda sinusoidal de amplitud y frecuencia deseadas.

Es importante hacer notar que todas las etapas utilizan al menos un filtro de compatibilidad electromagnética (EMC por sus siglas en inglés).

Estos filtros (unidades prefabricadas según especificación) separan cualquier interferencia electromagnética producida por las señales conmutadas provenientes tanto de las fuentes como del control de modulación ancho de pulso, señales que inherentemente provocan gran cantidad de ruido electromagnético que podría alterar de manera impredecible el funcionamiento y la exactitud de los circuitos de medición y de la computadora central.

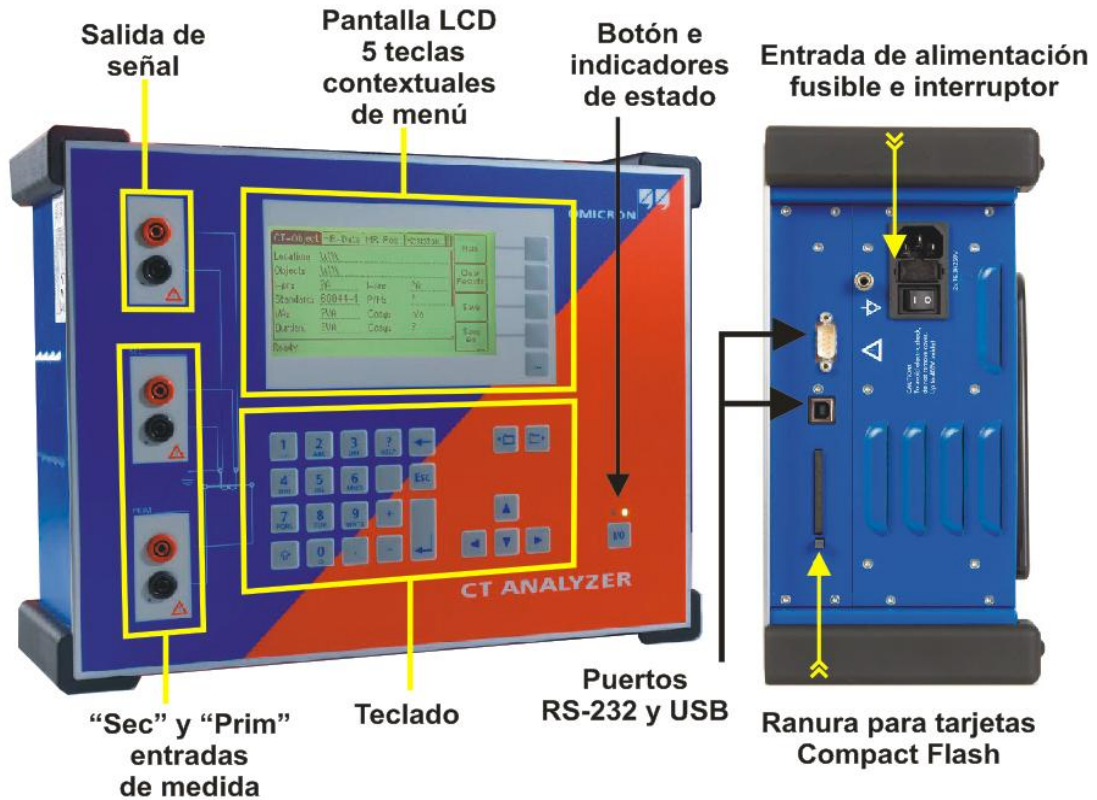
Figura 25. Diagrama de bloques del equipo CT Analyzer de Omicron para prueba de transformadores de instrumento



Fuente: OMICRON electronics GmbH 2012. *Manual de usuario.*

CTAnalyzerUM.SP.3. p. 50.

Figura 26. Descripción de controles y entradas de CT Analyzer



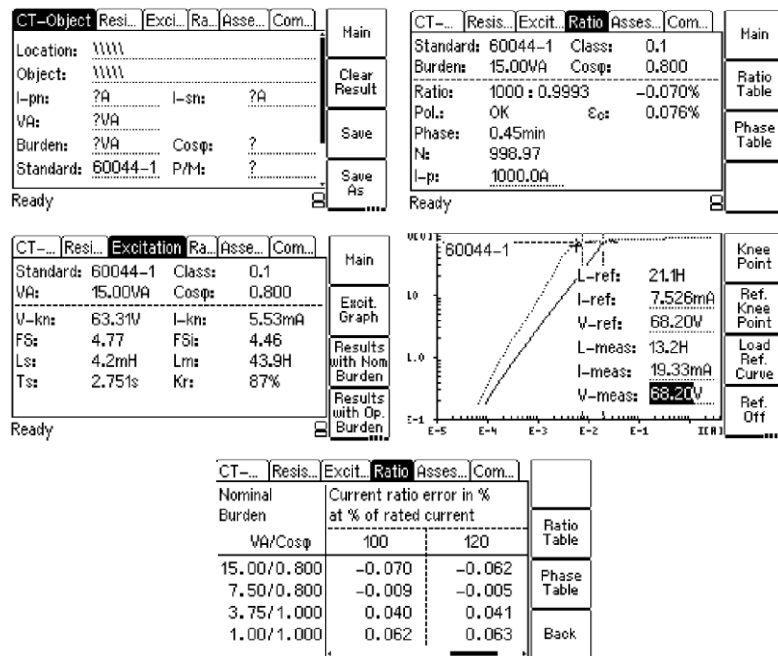
Fuente: OMICRON electronics GmbH 2012. *Manual de usuario.*
CTAnalyzerUM.SP.3. p. 50.

El procedimiento para realizar una prueba de un transformador de corriente se puede listar en los siguientes 5 pasos que corresponden a sendos menús en la pantalla de la unidad (figura 27):

- Ingreso de datos del transformador de corriente o determinación automática.

- Ingreso de datos de carga del secundario (*burden*) o medición automática del mismo.
- Medición automática de resistencia del secundario del transformador, determinación de la curva de excitación y relación de transformación.
- Generación de reporte y evaluación de resultados.

Figura 27. Pantallas de menú de las fases de prueba de CT Analyzer



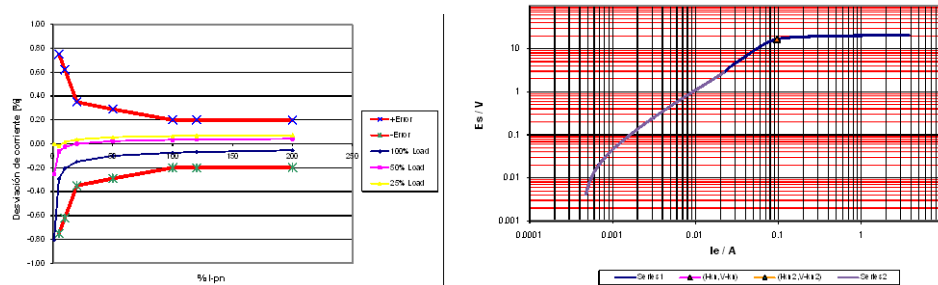
Fuente: elaboración propia con imágenes cortesía Unidad de Administración de Medidores y Laboratorio, Empresa Eléctrica de Guatemala, mayo de 2014.

El reporte de resultados se despliega desde la aplicación denominada *CTA Remote Excel File Loader*, Versión 4.30, libro de Microsoft Excel habilitado para macros en formato de archivo .xml, con macros desarrollados en lenguaje *Visual Basic for Applications*, de Microsoft, el reporte puede obtenerse a través

de la descarga en tiempo real inmediatamente después de la prueba si la unidad CT Analyzer se encuentra conectada vía puerto USB con la computadora donde está el archivo o posteriormente, con los datos de la prueba almacenados en una unidad de memoria *Compact Flash* de los datos generados por la unidad CT Analyzer en la prueba.

Las siguientes tablas y figuras pertenecen a un reporte generado automáticamente en las pruebas a un transformador de corriente tipo ventana marca Schneider de relación nominal 400:5, como ejemplo.

Figura 28. Curvas de error de relación y curva de excitación como parte de un reporte generado para un transformador de corriente



Fuente: cortesía Unidad de Administración de Medidores y Laboratorio, Empresa Eléctrica de Guatemala, La Castellana, mayo de 2014

Tabla II. **Captura gráfica de reporte de resultados de una prueba de un CT Analyzer de un transformador de corriente**

Company Name:	EMPRESA ELECTRICA DE GUATEMALA
Company Address:	8a Avenida 29-38 Zona 8 Guatemala
Order Number:	

Información general de la prueba:		Fecha/hora:	2014-04-07, 03:12:45 PM
Dispositivo de prueba:	CT-Analyzer	N° de serie del dispositivo:	KH018G
Nombre de archivo:	C:\OMICRON\CTAnalyzer\RemoteEFL\TEMP\XMLData(1).xml		
Evaluaciones:	OK		

Ajustes de la prueba utilizados:

I-pn:	400.0 A	Ubicación:		Equipo:	
I-sn:	5.0 A	Compañía:	EEGSA	Fabricante:	Schneider mx
Carga nominal:	5.0 VA / 0.8	País:	GUATEMALA	Tipo:	AF-0
Carga funcional:	5.0 VA / 0.9	Estación:	LAB 1	Número de serie:	M355660/3
Norma aplicada:	IEC 60044-1	Alimentador/Bahía:	N/A	Número del núcleo:	1
Tipo de núcleo (P/M):	M	Fase:	N/A	Toma:	
Clase:	0.2	IEC-ID		Opcional:	
FS:	20.0	ext (lcth):	120 %		
f:	60.0 Hz	max. Rct:	0.071 Ω		

Prueba de resistencia:

Rmed (25°C):	0.05925 Ω
Rref (75°C):	0.07066 Ω

Prueba de carga:

Carga:		cos φ:	Z:
vmed:		Imed:	

Prueba de excitación:

V-kn:	16.626 V	I-kn:	0.096414 A	Resultado con carga nominal:	Resultado con carga funcional:
V-kn 2:	#N/A	I-kn 2:	#N/A	FS: >16.07997375	FSi: >15.9139775
LS:	0.0001259H	Lm:	0.4943H	Ts:	1.972s
Kr:	93.7 %				

Prueba de relación:

Relación:	400.0	:	4.99666	ε :	-0.0668 %	Δφ:	2.97 min	Polaridad:	OK	N:	79.88
				ε _c :	0.1176 %						

VA/cosPhi	Error de relación de corriente en % a % de corriente nominal							
	1	5	10	20	50	100	120	200
5 VA/ 0.8	-0.806	-0.292	-0.206	-0.149	-0.100	-0.074	-0.068	-0.053
2.5 VA/ 1	-0.254	-0.063	-0.025	0.000	0.023	0.034	0.036	0.041
1.25 VA/ 1		-0.017	0.016	0.037	0.056	0.065	0.067	0.072
1 VA/ 1		-0.007	0.024	0.045	0.063	0.072	0.074	0.078
VA/								

VA/cosPhi	Desplazamiento de fase en [min] al % de la corriente nominal							
	1	5	10	20	50	100	120	200
5 VA/ 0.8	23.362	7.017	4.865	3.513	2.465	1.817	1.656	1.194
2.5 VA/ 1	33.525	10.654	7.618	5.873	4.449	3.726	3.547	3.133
1.25 VA/ 1		9.054	6.227	4.636	3.379	2.808	2.687	2.356
1 VA/ 1		8.696	5.905	4.366	3.167	2.610	2.499	2.188
VA/								

Fuente: cortesía Unidad de Administración de Medidores y Laboratorio, Empresa Eléctrica de Guatemala, La Castellana, mayo de 2014.

4. COMPARACIÓN ENTRE EQUIPOS TRADICIONALES Y EQUIPOS DE BAJA FRECUENCIA Y BAJA TENSIÓN Y CORRIENTE PARA PRUEBA DE TRANSFORMADORES DE INSTRUMENTACIÓN

4.1. Comparación de factores entre equipo tradicional y equipo de baja frecuencia y baja tensión

Existen suficientes datos para evidenciar las diferencias que muestran los diversos rubros de equipo para prueba de transformadores de instrumentación que aquí se han detallado.

Puede verse una evolución de acuerdo con el avance de las tecnologías en materia eléctrica, microelectrónica, informática y ciencias de los materiales eléctricos, entre otras, que han hecho posible diseñar aplicaciones y soluciones lo suficientemente desarrolladas como para poder integrarlas en un dispositivo como el CT Analyzer.

Hace décadas, solo se contaba con dispositivos que trabajaban con corrientes nominales, que precisaban de fuentes de corriente muy grandes para inyectar los parámetros de prueba requeridos, pues no se concebían equipos con las escalas tan grandes de integración de componentes y funciones y por ende, la complejidad y alcance posibles. Esto hacía que, se necesitara unir varias piezas individuales de equipo de porte y peso considerables, situación inherente a las magnitudes eléctricas de las pruebas requeridas, para cada parte del circuito de prueba.

La siguiente es una comparación analítica detallada de las principales ventajas y desventajas al considerar ocho aspectos prácticos de uso, desempeño, economía y tecnología: peso y portabilidad, exactitud, manejo y productividad, tiempo de montaje y pruebas, posibilidad de actualizaciones, recalibraciones, pruebas para transformadores de múltiples relaciones y costo para cada una de las tres clases estudiadas de equipos para pruebas de transformadores de instrumento.

4.1.1. Peso y portabilidad

Las pruebas para transformadores de instrumentos usando equipos de la clase inyección de corriente nominal en primario, en realidad se arman con una serie de componentes; los pesos típicos de estos equipos son del orden de algunos cientos de kilogramos, pudiéndose usar de 4 a 6 piezas de equipo diverso, que sumarían alrededor de 600 kg; aparte, cables de calibre y aislamiento que suman tamaño y peso considerables, debido a las dimensiones eléctricas manejadas, grúas para su manejo y el vehículo para transportar todo aquello; en total se llega a las 2 toneladas de peso total.

Los equipos de inyección de corriente en primario tienen un peso un poco más manejable, de 40 hasta 70 kg, con una sola pieza de equipo; aunque es portable por una sola persona con ayuda de una carreta o ruedas, es necesario ejercer cuidado en el transporte, ya que es un peso considerable aún, y no es conveniente para una persona levantarlo por sí misma sin ayuda, por el riesgo de lesiones físicas o caídas.

Los equipos de baja tensión y baja frecuencia suman un total de 8 kg con accesorios, peso que los hace totalmente portátiles y seguros para que una sola persona los pueda transportar sin problemas ni esfuerzos grandes.

4.1.2. Exactitud

Las pruebas para transformadores de instrumentos, usando equipos de la clase inyección de corriente, escala nominal en primario, son capaces de la mayor exactitud posible en este tipo de pruebas con error de hasta de 20 partes por millón; esto se debe a su completo circuito de control con devanados de compensación y detección.

Los de inyección de corriente en primario trabajan con una clase de exactitud de 2,5 %, que resulta suficiente para transformadores de instrumento de protección, pero deficiente para los de medición, en donde las exactitudes que se necesitan deben ser menores a 0,3 % y 0,2 %.

Para ambos casos, debe tomarse en cuenta el ruido por inducción introducido por los cables de las pruebas, que suelen ser largos y están cerca de campos electromagnéticos de la frecuencia en que son realizadas las pruebas (50/60 Hz).

Los equipos de baja tensión y baja frecuencia ofrecen clases de exactitud de 0,02 %; adicionalmente, son inmunes al ruido por inducción en frecuencias de la red, pues operan con frecuencias más bajas que la de la red eléctrica y cables muy cortos.

4.1.3. Manejo y productividad

Para el caso de los equipos de inyección en primario (nominal y no nominal) se requiere indefectiblemente de varios elementos de personal y hasta 6 piezas de equipo para llevar a cabo la prueba y manejo de todo el equipo.

La cantidad de cables y conexiones a utilizar o donde pudiera alguien equivocarse puede ser todo un reto, al requerir realambrado manual para cada una de las pruebas, (relación, polaridad, saturación, etc.) Todo esto sumado al inherente sistema dato por dato, para tabulado manual de datos de prueba, puede tomar para el experto decenas de minutos y hasta horas con cada medición.

Los equipos de baja tensión y baja frecuencia, equipados con computadoras y procesadores de señal, pueden realizar la batería de pruebas automáticamente y generar el reporte completo de características junto con el dictamen de si la unidad pasa la prueba o no, en hoja electrónica, todo en 58 segundos por cada unidad. Dichos equipos brindan un grado de productividad que supera por mucho los sistemas anteriores, requerimiento preponderante sobre todo en líneas de producción de fábricas de unidades nuevas o tareas de pruebas de transformadores de instrumento en serie.

4.1.4. Tiempo de montaje y pruebas

Con los equipos de inyección en primario y escala nominal, se necesita planificación previa y logística para sacar del almacén, transportar y descargar equipo en el lugar designad y reunir al personal que asista la prueba; en el punto, la prueba puede tomar varias horas por cada unidad de transformador de instrumento.

El equipo requiere ser trasladado por varias personas, y ejercerse con cautela pues es bastante pesado. Con los equipos electrónicos de baja tensión y frecuencia, el montaje de la computadora, unidad, cables y accesorios puede hacerse en 3 minutos, y el lapso de las pruebas por cada unidad de transformador de instrumento es de 58 segundos.

4.1.5. Posibilidad de actualizaciones

El equipo de inyección en primario es convencional, mide parámetros fijos y sus funciones están ya construidas, no es susceptible de actualización, ni es posible ampliar sus funciones.

Para el equipo electrónico de baja frecuencia y baja tensión existen actualizaciones y extensiones para pruebas disponibles en línea o activadas con llave de software.

Es necesario adquirirlas por aparte con el fabricante, pero ofrece flexibilidad y extensión de funciones sin cambiar el equipo. El *firmware* y sus aplicaciones se actualizan periódicamente desde el sitio web del fabricante.

4.1.6. Recalibraciones

Para los equipos convencionales es requerido el envío anual de los equipos de vuelta a la fábrica o algún laboratorio de metrología para la verificación de su calibración. Esto implica gastos del servicio brindado y costos de flete y gestiones aduanales, aparte del tiempo que no puede utilizarse el equipo por estar en tránsito y el riesgo de deterioro del mismo por manejo durante el transporte.

El equipo de baja tensión y baja frecuencia incluye un transformador de corriente patrón clase de exactitud 0,02, para calibración del equipo automático realizada por el propietario de la unidad sin retornarlo a fábrica, solo en caso de estar fuera del rango y necesitara un ajuste.

4.1.7. Pruebas de transformadores de corriente de múltiples relaciones

Algunos transformadores de instrumento de corriente poseen múltiples relaciones de transformación; esto es bastante común en los de alta tensión que incluyen protección y medición; para estos equipos es necesario realizar y cablear una prueba individual por cada relación de transformación existente. Hay transformadores de hasta 8 relaciones distintas, con los equipos convencionales; por tanto debe realizarse una prueba y cableado a la vez por cada una de las relaciones de transformación, tomando datos entre prueba y prueba.

Para el equipo electrónico de baja tensión y baja frecuencia existe un aditamento que permite realizar de una sola vez hasta seis pruebas para seis distintas relaciones de transformación en una sola conexión y operación, dicho accesorio se instala a través de una interfaz diseñada para esto, y automáticamente el equipo genera los reportes de las seis pruebas para las respectivas relaciones de transformación existentes.

4.1.8. Comparación de costos

Para la primera categoría, equipos de inyección en primario nominal, la serie de piezas de equipo de laboratorio incluye transformador de corriente patrón, generador de corriente y caja de *burden*, la inversión total se estima en \$60 000,00, para la inyección en primario, valores no nominales. El precio en internet ronda los \$20,00; para el equipo electrónico de baja tensión y baja frecuencia el valor proporcionado por el distribuidor autorizado para Guatemala, es de \$30 350,00, según cotización para julio 2014.

Figura 29. **Cotización de equipo de baja tensión y baja frecuencia puesto en Guatemala**



COTIZACION

De: ENERGY Transmission & Distribution, S.A. (ETD) Guatemala, C.A. Para:

Oferta No.	EGS-GU-03-14-N	Tiempo de entrega	6 a 7 Semanas
Fecha	4-Aug-14	Terminos de Pago	Crédito 30 días
Atencion	Nelson Mendez	Validez	30 días
Telefono y correo		Garantia	24 meses
INCOTERMS	DDP con IVA Bodegas	Emitir Orden de Compra a	ETD

ITEM	CANT.	DESCRIPCION	PRECIO UNITARIO	PRECIO TOTAL
1	1	CTANALYZER Advanced Software Package. Equipo para probar Transformadores de corriente con capacidad de medición especial para: CTS de acuerdo a IEC-60044 e IEEE C57.13 CT's de protección de acuerdo a IEC-60044-6 Hasta clase 0.1 Voltaje de punto de rodilla desde 1V hasta 30KV PC Tool Set, licencia Quick Test, con la cual se puede verificar la relación y polaridad en PT's. Incluye set de cables y accesorios standard, manual del usuario y capacitación de un día en sitio en español	\$ 27,950.00	\$ 27,950.00
2	1	CT PATRON marca OMICRON, modelo VEHZ0649, para verificar la calibración del CTANALYZER. CT Patrón con precisión Clase 0.02 y ródios 2000:1 y 2000:5	\$ 2,400.00	\$ 2,400.00
Precio Total DDP con IVA				\$30,350.00

Fuente: documento proporcionado por el Ing. Noé Ruiz, ETD, Guatemala.

Tabla III. **Comparación de parámetros en tres clases de equipo para pruebas de transformadores de instrumento**

	Inyección de corriente nominal en primario	Inyección de corriente en primario	Baja tensión y baja corriente
Peso y portabilidad	2 toneladas de equipo, fuente de alta tensión, amplificadores, transporte en camión.	Más de 61 kg / 134 lbs., sin incluir caja externa de <i>burden</i> . Transporte en vehículo de carga liviano.	Menor de 8 kg /18 lbs. La maleta y sus accesorios pueden ser transportados por una sola persona a pie.

Continuación de la tabla III.

Exactitud	Excelente debido al diseño de circuito acorde a las normas IEEE C57.13-2008-a,	2,5%, ok para CT de protección, mal para CT de medición de alta exactitud, cables introducen distorsión por ruido en 50/60 Hz	0,02 %, garantía de inmunidad al ruido por utilizar frecuencias muy bajas.
Manejo y productividad	Requiere varios elementos de personal para llevar a cabo la prueba y manejo de todo el equipo.	Realambrado para cada tipo de prueba, (relación, polaridad, saturación, etc.) Tabulado manual de datos de prueba	Batería de pruebas esenciales y adicionales con generación automática de reporte completo de pruebas y características integradas en una hoja electrónica.
Tiempo de montaje de pruebas	Varios días de planificación y logística, reunir personal, prueba puede tomar horas por cada unidad de CT.	El manejo del equipo requiere ser trasladado por al menos 2 personas, debe ejercerse cuidado pues es bastante pesado.	Montaje de computadora, unidad, cables y accesorios en 3 minutos, lapso de las pruebas 58 segundos.
Posibilidad de actualizaciones	Equipo convencional, mide parámetros fijos y sus funciones están ya construidas no es susceptible de actualización	El equipo es convencional, mide parámetros fijos y sus funciones están ya construidas no es susceptible de actualización	Actualizaciones y extensiones para pruebas disponibles en línea o activadas con una llave de software previo pago. Firmware y aplicaciones se actualizan periódicamente.
Recalibraciones	Envío anual de los equipos de vuelta a la fábrica o laboratorio de metrología para su calibración o ajuste	Envío anual de los equipos de vuelta a la fábrica o laboratorio de metrología para su calibración o ajuste	Incluye un transformador de corriente patrón clase de exactitud 0,02 para calibración del equipo sin retornarlo a fábrica.
Pruebas de CT de múltiples relaciones	Es necesario realizar y cablear una prueba individual para cada relación de transformación existente. Hay transformadores de hasta 8 relaciones distintas.	Es necesario realizar y cablear una prueba individual para cada relación de transformación existente. Hay transformadores de hasta 8 relaciones distintas.	Con el accesorio SB2 pueden manejarse pruebas de una sola vez sin re cablear hasta para 6 relaciones de transformación en una misma unidad.
Costo	\$60000,00	\$20 200,00	\$30 350,00

Fuente: elaboración propia.

4.2. Análisis de retorno de inversión para equipo de baja frecuencia y baja tensión (CT Analyzer de Omicron Electronics)

Como es usual con todo equipo científico y de laboratorio de energía, los costos de adquisición de un equipo comprobador tienden a ser elevados. Las razones para esto son muchas; se podrían enumerar las más evidentes, como el alto grado de especialización de las fábricas, su ingeniería y mano de obra, la contemporánea exigencia global de avance y actualidad en tecnologías aplicadas, escalas de miniaturización, costes de investigación y desarrollo, complejidad y elaboración en técnicas y tecnologías de fabricación, los sistemas de calidad de productos y servicios, el soporte técnico y finalmente los aranceles de importación y flete.

Desde el punto de vista financiero, para poder adquirirlo es menester una erogación significativa de fondos, que solamente es procedente si se hace como inversión con miras a convertirlo en un bien de capital; es decir para poder producir otros bienes o servicios que no sólo garanticen el retorno de la inversión, sino que puedan establecer una línea de un nuevo servicio que se preste a internos y externos, como un ingreso adicional a la compañía y como ahorro permanente, que finalmente representa generación de valor.

En el siguiente análisis se demuestran estos dos aspectos al integrar un equipo electrónico de baja tensión y baja frecuencia al laboratorio de calibración de transformadores de instrumentos, utilizados en mediciones indirectas de energía, de una empresa distribuidora de energía.

Tabla IV. **Costos de calibración realizada por terceros para transformadores de corriente (por unidad)**

	Costo de servicio calibración externa	Flete (envío y retorno, Latinoamérica)	Valor total por unidad
Transformador baja tensión	\$ 10,65	\$ 50,00	\$ 60,65
Transformador media tensión	\$ 51,83	\$ 210,00	\$ 261,83

Fuente: elaboración propia, con datos proporcionados por el Departamento de Inspección, Pérdidas y Medida, Empresa Eléctrica de Guatemala, julio 2014.

Para el caso particular del Departamento de Inspección, Pérdidas y Medida de la Empresa Eléctrica de Guatemala, las verificaciones de calibración de los transformadores de instrumento de las mediciones se realizan tanto para los equipos de medición salientes que se arman con equipo nuevo, como para las mediciones entrantes, desmontadas de cuentas de baja, con unidades usadas que, si no muestran deterioro y cumplen con las pruebas de exactitud, vuelven a utilizarse en otros puntos de medición.

A continuación se dan a conocer montos anuales por servicios de calibración realizados por terceros para transformadores de instrumento.

Tabla V. **Montos anuales por servicios de calibración realizados por terceros para transformadores de instrumento**

	Cantidad de unidades en cada tipo de medición	Promedio mensual de mediciones usadas (entrantes)	Promedio mensual de mediciones nuevas (salientes)	Unidades calibradas por mes	Unidades calibradas por año	Costo de servicio calibración externa	Costo de servicio calibración externa anual
Secundarias (BT)	3	3	6	27	324	\$ 60,65	\$ 19 650,60
Primarias (MT)	6	2	5	42	504	\$ 261,83	\$ 131 962,32

Fuente: Departamento de Inspección, Pérdidas y Medida, Empresa Eléctrica de Guatemala, julio de 2014.

El cálculo de retorno de inversión se realizó con la ayuda de una herramienta en línea disponible por parte del fabricante de equipos de calibración para medidores de energía, Radian, disponible para descarga en el sitio web de Radian, dentro del apartado “*calculators*”.

La hoja electrónica fue modificada para tomar en cuenta el sistema de calibración que se utiliza en la distribuidora de energía, considerando factores anuales como depreciación del 10 %; el crecimiento de clientes industriales y comerciales con equipo de medición de la compañía se estimó en 0,05 %, la tasa de inflación del 4 % y una tasa de descuento del 15 %; así también costos inherentes como mano de obra, administrativos, costos por servicios de calibración externos, costos de administración y el valor de adquisición del equipo.

En cada columna por año se separan los costos de calibración del equipo de prueba.

También se da a conocer el costo anual de la calibración de todas las unidades de transformadores de instrumento, considerados por externos y también haciéndolo internamente con ayuda del equipo.

Finalmente, se resta el acumulativo de los ahorros logrados con la calibración externa del costo inicial del equipo, más su depreciación y los costos de calibración (también externos) del propio equipo; luego se divide entre lapsos de tiempo iguales (un año) para determinar el tiempo en que, con el ritmo de trabajo estipulado, el ahorro logrado igualaría la inversión realizada.

Tabla VI. Hoja de cálculo de retorno sobre inversión para adquisición de equipo CT Analyzer de Omicron Electronics

CALCULADORA DE RETORNO SOBRE INVERSIÓN									
Servicio de calibración externo contra adquisición de sistema interno									
CASO CT ANALYZER DE OMICRON									
Información general		Ingrese los datos en las celdas verdes para personalizar. Coloque el puntero para desplegar instrucciones y explicación.							
Año actual	2014	Tipo de cambio		Q7.80					
Moneda	\$								
Crecimiento anual	0.05%								
Inflación anual	4.0%								
Tasa de descuento	15.0%								
Horas al año	1980								
Tarifa de mano de obra	\$ 5								
Tarifa de funcionamiento	\$ 4								
Tarifa de administración	\$ 2								
Costos de terceros		Promedio	Tiempo	Total Cal.					
CTS BAJA T	\$ 61	0.50	\$ 64						
CTS MEDIA T	\$ 262	0.50	\$ 265						
OTROS	\$ 0	0.00	\$ 0						
CT Analyzer		Costo total	2014	2015	2016	2017	2018		
Depreciación anual	10%	\$ 3,035	\$ 3,035	\$ 3,035	\$ 3,035	\$ 3,035	\$ 3,035		
Calibraciones por año	0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0		
Costo calibración	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0		
Costo anual del analizador		\$ 3,035	\$ 3,035	\$ 3,035	\$ 3,035	\$ 3,035	\$ 3,035		
Costo de calibración por hora		\$ 20	\$ 20	\$ 20	\$ 20	\$ 20	\$ 20		
Inventario carga de trabajo		Cal/año	2014	2015	2016	2017	2018		
CTS BAJA T	1	160	160	160	160	160	160		
CTS MEDIA T	1	40	40	40	40	40	40		
OTROS	0	0	0	0	0	0	0		
Horas de Calibración		Cal	Admin	2014	2015	2016	2017	2018	
CTS BAJA T	0.50	0.25	120.00	120.06	120.12	120.18	120.24	120.24	
CTS MEDIA T	0.50	0.25	30.00	30.02	30.03	30.05	30.06	30.06	
OTROS	0.50	0.25	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
Total de horas al año			150.00	150.08	150.15	150.23	150.30		
Costo de calibración a través de terceros			2014	2015	2016	2017	2018		
CTS BAJA T		\$ 10,184	\$ 10,597	\$ 10,602	\$ 10,607	\$ 10,613	\$ 10,613		
CTS MEDIA T		\$ 10,593	\$ 11,022	\$ 11,028	\$ 11,033	\$ 11,039	\$ 11,039		
OTROS		\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0		
Total		\$ 20,777	\$ 21,619	\$ 21,630	\$ 21,641	\$ 21,652	\$ 21,652		
Costo total de calibración interna con CT Analyzer			2014	2015	2016	2017	2018		
CTS BAJA T		\$ 978	\$ 985	\$ 985	\$ 986	\$ 986	\$ 986		
CTS MEDIA T		\$ 244	\$ 246	\$ 246	\$ 246	\$ 247	\$ 247		
OTROS		\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0		
Costo de operación total		\$ 1,222	\$ 1,231	\$ 1,231	\$ 1,232	\$ 1,233	\$ 1,233		
Costo de calibración anual		\$ 3,035	\$ 3,035	\$ 3,035	\$ 3,035	\$ 3,035	\$ 3,035		
Costo total de calibración interno (EEGSA)		\$ 4,257	\$ 4,266	\$ 4,266	\$ 4,267	\$ 4,268	\$ 4,268		
Costo de capital		\$ 4,553	\$ 4,553	\$ 4,553	\$ 4,553	\$ 4,553	\$ 4,553		
Ahorro (Déficit)		\$ 11,968	\$ 12,801	\$ 12,811	\$ 12,821	\$ 12,831	\$ 12,831		
Utilización del equipo:			8%	8%	8%	8%	8%		
El tiempo de retorno de inversión es			2.4	años.					

Fuente: adaptado de http://www.radianresearch.com/ROI_calculators/RS933_ROI.xls.

Consulta: julio de 2014.

Previo a calcular el inventario de carga de trabajo anual (cantidad de transformadores a ser calibrados interna o externamente) se realizaron las siguientes consideraciones:

- Si se deseara calibrar la totalidad de los transformadores utilizados para construir mediciones, se tendrían que enviar al extranjero 324 unidades de transformadores de baja tensión y 504 de media tensión, trabajo cuyos costos de calibración y envío serían exorbitantes, de acuerdo con lo detallado en la tabla V.
- Para fines prácticos, se recurrirá a la estadística y se utilizará la solución de “muestreo de aceptación”, que consiste en tomar muestras aleatorias de lotes de materias primas o de productos terminados, equipos en funcionamiento para inspeccionar y medir, contra estándares predeterminados. Se usará como referencia de evaluación la normativa ANSI/ASQC Z1.4-2008, en específico el plan de doble muestreo, con un AQL igual a 2,5. Los criterios para escoger los tamaños de muestra están detallados a continuación.
- Dado el anterior criterio, se tienen escenarios basados en tres niveles de rigidez de inspección general. El nivel de inspección reducido contempla, según la normativa mencionada, 10 muestras de transformadores de baja tensión y 16 de media tensión, que según evaluación en la calculadora de retorno de inversión descrita anteriormente, arrojaría un tiempo de retorno de inversión de 5 años 8 meses; el segundo escenario, con nivel normal de inspección, contempla 64 muestras de transformadores de baja tensión y 100 de media tensión que arrojarían 1 año y medio para recuperar la inversión y finalmente, el escenario con un nivel de inspección riguroso, contemplaría 100 muestras de transformadores de baja tensión y 160 de

media tensión, con los que la calculadora ha computado diez meses para el retorno de la inversión realizada en el CT Analyzer.

Tabla VII. Criterio para selección de tamaños de muestra de transformadores de instrumento, según tamaños de lote de acuerdo con la norma ANSI/ASQ Z1.4-2008

Codigos literales (índices) para tamaños de muestra				Tamaños de muestra para Plan de muestreo doble					
Tamaño de lote	Nivel de Inspección I (Reducido)	Nivel de Inspección II (Normal)	Nivel de Inspección III (Riguroso)	Nivel de Inspección I (Reducido)		Nivel de Inspección II (Normal)		Nivel de Inspección III (Riguroso)	
				Literal	Tamaño	Literal	Tamaño	Literal	Tamaño
2 a 8	A	A	B						
9 a 15	A	B	C						
16 a 25	B	C	D	A		A		A	
				B		B	4	B	4
26 a 50	C	D	E	C		C	6	C	6
51 a 90	C	E	F	D	4	D	10	D	10
91 a 150	D	F	G	E	6	E	16	E	16
151 a 280	E	G	H	F	10	F	26	F	26
				G	16	G	40	G	40
281 a 500	F	H	J	H	26	H	64	H	64
501 a 1200	G	J	K	J	40	J	100	J	100
1201 a 3200	H	K	L	K	64	K	160	K	160
3201 a 10000	J	L	M	L	100	L	250	L	250
10001 a 35000	K	M	N	M	160	M	400	M	400
35001 a 150000	L	N	P	N	250	N	630	N	630
150001 a 500000	M	P	Q	P	400	P	1000	P	1000
				Q	630	Q	1600	Q	1600
500001 y mayor	N	Q	R	R	1000	R	2500	R	2500
								S	4000

Fuente: elaboración propia. Condensado, traducido y modificado de *American National Standard/American Society for Quality – Sampling procedures and tables for inspection by attributes, Z1.4-2008, p.10-16*

Tabla VIII. **Escenarios ponderados para determinar inventario de carga de trabajo anual de calibración de transformadores de instrumento**

Nivel de Inspección (Escenario)	Nivel de confianza	No. de muestras		Retorno de inversión en años
		BT	MT	
I Reducido	Alto	10	16	5,6
II Normal	Equilibrado	64	100	1,5
III Riguroso	Bajo	100	160	0,8

Fuente: elaboración propia.

CONCLUSIONES

1. La tecnología de los últimos equipos electrónicos de baja tensión y baja frecuencia para verificación de transformadores de instrumento, ha marcado una tendencia importante no solo por sus ventajas técnico-económicas sino por todos los aspectos de seguridad, conveniencia y flexibilidad que ofrece.
2. El aporte que brinda la integración de un sistema electrónico de baja tensión y baja frecuencia para prueba de transformadores de instrumento y un sistema de información, es de valor incalculable para la instrumentación eléctrica y en específico para empresas donde es necesaria la verificación de mediciones de energía.
3. La implementación de procedimientos de laboratorio de verificación de la condición y exactitud de los equipos de medición, minimiza fallas, emergencias, pérdidas técnicas por inexactitud, suspensiones de servicio y pérdidas por no facturación.
4. Los equipos de baja tensión y baja frecuencia son livianos y portátiles; esto los hace útiles en escenarios tan diversos como pruebas en laboratorio y de campo, equipos de medición de industrias, grandes usuarios de energía, unidades de medición en subestaciones y circuitos de media tensión.

5. Los equipos de baja tensión y baja frecuencia ofrecen la mejor relación exactitud-versatilidad conocida hasta el momento en equipos para verificación de transformadores de instrumento.
6. La infraestructura necesaria para hacer localmente la comprobación de los equipos de medición propios de una distribuidora, permite simultáneamente ofrecer ese servicio a terceros, práctica que mejora el retorno de la inversión realizada en un sistema de esta naturaleza.
7. El uso de equipo electrónico de baja tensión y baja frecuencia, combinado con un eficaz plan de verificación de transformadores de instrumento en una distribuidora de energía, genera suficiente ahorro y valor como para garantizar que la inversión correspondiente retorne en el corto o mediano plazo.
8. La adquisición de equipo electrónico de baja tensión y baja frecuencia y un plan eficaz de verificación y calibración de transformadores de instrumento en una distribuidora de energía, tiene tanto potencial de mejoras técnicas y valor para los servicios de una distribuidora de energía, que podría calificarse de indispensable.

RECOMENDACIONES

1. Al adquirir equipos para comprobación y verificación de transformadores de instrumento es importante considerar los equipos electrónicos de la clase baja tensión baja frecuencia, pues son los más versátiles, y los de mejor relación costo - beneficio.
2. Es conveniente que las empresas distribuidoras con significativa cartera de clientes industriales y con equipo de medición indirecta, cuenten con un equipo electrónico de laboratorio de baja tensión y baja frecuencia, para comprobación de transformadores de instrumento.
3. Se sugiere que las empresas distribuidoras y comercializadoras consideren y evalúen la adquisición de equipos electrónicos de baja tensión y baja frecuencia, para potencializar y optimizar el estado y exactitud de medición, así como la protección de sus ingresos.
4. Para mejorar la tasa de retorno de una inversión en un equipo electrónico para comprobación de transformadores de instrumento de este nivel, es útil la promoción de servicios de calibración para terceros para generar ingresos extra.
5. Es importante que las evaluaciones de lotes de transformadores de instrumento, nuevos o usados, instalados en equipos de medición, se lleven a cabo de acuerdo con procedimientos estadísticos de muestreo de aceptación e inspección por atributos, de preferencia definidos por

normativa internacional, para que sea confiable, económicamente viable y óptimo.

BIBLIOGRAFÍA

1. ABB. *Instrument Transformers, Technical Information and application guide*. USA: ABB Inc. Pine Tops: 2004. 40 p. Código 1VAP420003-TG. Rev. A.
2. _____. *Instrument Transformer Reference*. ABB Inc. Pinetops: 2006. 40 p. Código 1VAP420001-TG. Rev. F.
3. American Society for Quality. *American National Standard - Sampling Procedures and Tables for Inspection by Attributes, Z1.4-2008*. Milwaukee WI, Estados Unidos: American Society for Quality, 2008.
4. _____. *Módulo II - 5 Transformadores de Instrumentos*. [en línea]. <<http://www.frlp.utn.edu.ar/materias/tydee/moduloi.pdf>>. [Consulta: enero de 2014].
5. CATHOLY, Ralph. Mobile calibration of instrument transformers in the field. *OMICRON Magazine*. 2011, Volumen 2, Fascículo 2. [en línea]. <https://www.omicron.at/fileadmin/user_upload/pdf/magazine/CT_Analyzer_Mobile_calibration_of_instrument_transformers_in_the_field_2011_issue2.pdf>. [Consulta: 20 de julio de 2014].
6. CHAPMAN, Stephen J. *Máquinas eléctricas*. 3a ed. Santa Fe de Bogotá: McGraw-Hill, 2001. 768 p. ISBN: 958-4100-56-4.

7. MEGGER. *Primary Current Injection Test Set PCITS2000 Datasheet*. [en línea]. documento PCITS2000_2_DS_en_V13, <<http://www.nahanagan.com/downloads/PCITS2000-2.pdf>>. [Consulta: mayo de 2014].
8. MIETH, Mathias. A class of its own. *OMICRON Magazine*. 2011, Volumen 2, Fascículo 2. [en línea]. <https://www.omicron.at/fileadmin/user_upload/pdf/magazine/CT_Analyzer_A_class_of_its_own_2011_issue2.pdf>. [Consulta: 20 de julio de 2014].
9. MILLMAN, Jacob. *Electrónica integrada*. 2a ed. Nueva York: McGraw-Hill, 1976. 913 p. ISBN: 84-255-0432-5.
10. MOORE, Justin H. *Manual de matemáticas financieras*. México: Uteha, 1946. 1347 p.
11. OMICRON electronics GmbH. *Manual de usuario*. CTAnalyzerUM.SP.3. USA: OMICRON, 2012. 208 p.
12. PORRELLI, Tony. When requirements change. *OMICRON Magazine*. 2013, Volumen 4, Fascículo 1. [en línea]. <https://www.omicron.at/fileadmin/user_upload/pdf/magazine/CT_Analyzer_When_requirements_change_2013_issue1.pdf>. [Consulta: 20 de julio de 2014].
13. RADIAN Research, Inc. *Return of investment calculator*. [en línea]. <http://www.radianresearch.com/ROI_calculators/RS933_ROI.xls>. [Consulta: mayo de 2014].

ANEXOS

Anexo 1. Códigos literales para tamaños de muestra

Lot or batch size	Special inspection levels				General inspection levels		
	S-1	S-2	S-3	S-4	I	II	III
2 to 8	A	A	A	A	A	A	B
9 to 15	A	A	A	A	A	B	C
16 to 25	A	A	B	B	B	C	D
26 to 50	A	B	B	C	C	D	E
51 to 90	B	B	C	C	C	E	F
91 to 150	B	B	C	D	D	F	G
151 to 280	B	C	D	E	E	G	H
281 to 500	B	C	D	E	F	H	J
501 to 1200	C	C	E	F	G	J	K
1201 to 3200	C	D	E	G	H	K	L
3201 to 10000	C	D	F	G	J	L	M
10001 to 35000	C	D	F	H	K	M	N
35001 to 150000	D	E	G	J	L	N	P
150001 to 500000	D	E	G	J	M	P	Q
500001 and over	D	E	H	K	N	Q	R

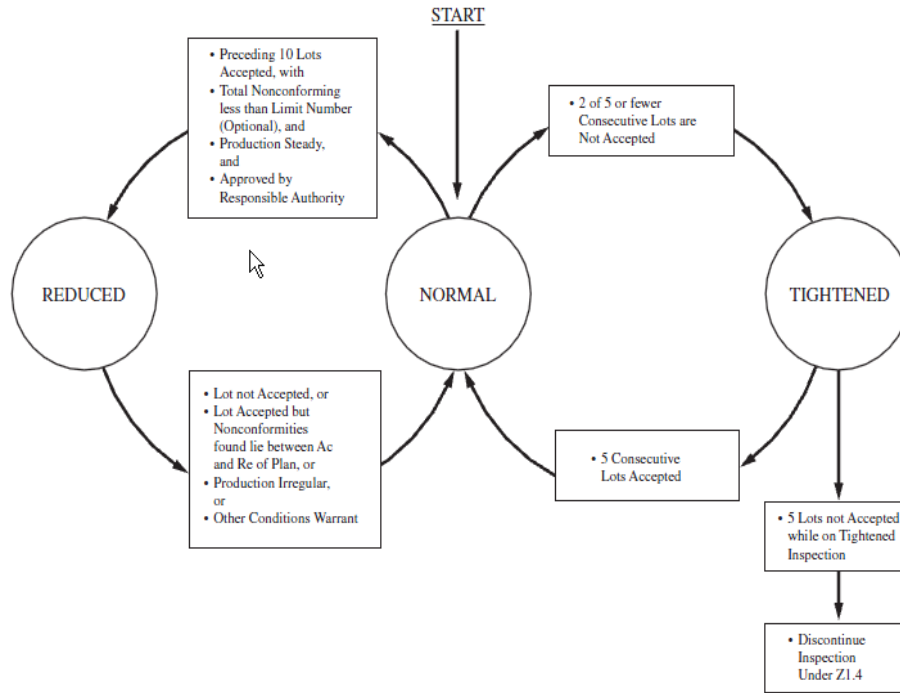
Fuente: ANSI/ASQ- Sampling Procedures and Tables for Inspection by Attributes, Z1.4-2008, p.10.

Anexo 3. Tabla maestra de planes de muestreo doble, nivel de inspección reducida

Sample size code letter	Sample	Sample size	Cumulative sample size	Acceptance Quality Limits (reduced inspection)†																									
				0.010	0.015	0.025	0.040	0.065	0.10	0.15	0.25	0.40	0.65	1.0	1.5	2.5	4.0	6.5	10	15	25	40	65	100	150	250	400	650	1000
				Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re
A				↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	
B				↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	
C				↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	
D	First Second	2 2	2 4	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	
E	First Second	3 3	3 6	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	
F	First Second	5 5	5 10	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	
G	First Second	8 8	8 16	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	
H	First Second	13 13	13 26	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	
J	First Second	20 20	20 40	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	
K	First Second	32 32	32 64	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	
L	First Second	50 50	50 100	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	
M	First Second	80 80	80 160	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	
N	First Second	125 125	125 250	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	
P	First Second	200 200	200 400	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	
Q	First Second	315 315	315 630	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	
R	First Second	500 500	500 1000	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	

Fuente: ANSI/ASQ- Sampling. *Procedures and tables for Inspection by Attributes, Z1.4-2008.*

Anexo 4. **Diagrama de flujo de reglas de cambio entre niveles de inspección, según aceptación o rechazo de lotes de producción**



Fuente: ANSI/ASQ- Sampling. *Procedures and tables for Inspection by Attributes. Z1.4-2008.* p. 9.