



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

**GUÍA PARA LA SELECCIÓN Y ESPECIFICACIÓN DE  
TRANSFORMADORES DE CORRIENTE Y POTENCIAL PARA  
SUBESTACIONES DEL SISTEMA ELÉCTRICO NACIONAL**

**José Isabel Chalí Mux**

Asesorado por el Ing. Fernando Alfredo Moscoso Lira

Guatemala, enero de 2018

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**GUÍA PARA LA SELECCIÓN Y ESPECIFICACIÓN DE  
TRANSFORMADORES DE CORRIENTE Y POTENCIAL PARA  
SUBESTACIONES DEL SISTEMA ELÉCTRICO NACIONAL**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
POR

**JOSÉ ISABEL CHALÍ MUX**

ASESORADO POR EL ING. FERNANDO ALFREDO MOSCOSO LIRA

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

**INGENIERO ELECTRICISTA**

GUATEMALA, ENERO DE 2018

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
FACULTAD DE INGENIERÍA



**NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA**

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

**TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO**

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
EXAMINADOR	Ing. Marvin Marino Hernández Fernández
EXAMINADOR	Ing. Jorge Gilberto González Padilla
EXAMINADOR	Ing. Bayron Armando Cuyán Culajay
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

## 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:

### GUÍA PARA LA SELECCIÓN Y ESPECIFICACIÓN DE TRANSFORMADORES DE CORRIENTE Y POTENCIAL PARA SUBESTACIONES DEL SISTEMA ELÉCTRICO NACIONAL

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, con fecha 21 de septiembre de 2015.



**José Isabel Chalí Mux**

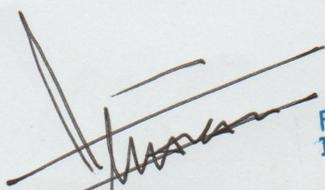
Guatemala, 31 de mayo de 2016

Ingeniero  
Gustavo Benigno Orozco Godínez  
Coordinar Área de Potencia  
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica  
Facultad de Ingeniería  
Universidad de San Carlos de Guatemala  
Presente

Estimado Ingeniero Orozco:

Atentamente, de acuerdo con la designación hecha por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, tengo a bien informarle que he tenido a bien asesorar el trabajo de graduación titulado: **"GUÍA PARA LA SELECCIÓN Y ESPECIFICACIÓN DE TRANSFORMADORES DE CORRIENTE Y POTENCIAL PARA SUBESTACIONES DEL SISTEMA ELÉCTRICO NACIONAL"**, desarrollado por el estudiante **JOSÉ ISABEL CHALÍ MUX**, quién se identifica con el carné 2010-21221, para el cual he hecho la revisión técnica que me corresponde, concluyendo que cumple con el alcance y los objetivos planteados en el protocolo que le fue aprobado para su desarrollo, para lo cual someto a su consideración la aprobación del mismo, siendo responsables de contenido técnico el estudiante y el suscrito, en calidad de asesor.

Sin otro particular, me despido de usted

  
Fernando Alfredo Moscoso Lira  
Ingeniero Mecánico Electricista  
Colegiado 6386

Fernando Alfredo Moscoso Lira  
Ingeniero Mecánico Electricista  
Colegiado No. 6386



Ref. EIME 75. 2016.

Guatemala, 26 de JULIO 2016.

Señor Director  
Ing. Francisco Javier González López  
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica  
Facultad de Ingeniería, USAC.

Señor Director:

Me permito dar aprobación al trabajo de Graduación titulado:  
**GUÍA PARA LA SELECCIÓN Y ESPECIFICACIÓN DE  
TRANSFORMADORES DE CORRIENTE Y POTENCIAL PARA  
SUBESTACIONES DEL SISTEMA ELÉCTRICO NACIONAL,**  
del estudiante José Isabel Chalí Mux, que cumple con los  
requisitos establecidos para tal fin.

Sin otro particular, aprovecho la oportunidad para saludarle.

Atentamente,  
ID Y ENSEÑADA TODOS

Ing. Gustavo Benigno Orozco Godínez  
Coordinador Área Potencia



SRO



REF. EIME 75. 2016.

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; JOSÉ ISABEL CHALÍ MUX titulado: GUÍA PARA LA SELECCIÓN Y ESPECIFICACIÓN DE TRANSFORMADORES DE CORRIENTE Y POTENCIAL PARA SUBESTACIONES DEL SISTEMA ELÉCTRICO NACIONAL, procede a la autorización del mismo.

Ing. Francisco Javier González López



GUATEMALA, 18 DE NOVIEMBRE 2016.



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: **GUÍA PARA LA SELECCIÓN Y ESPECIFICACIÓN DE TRANSFORMADORES DE CORRIENTE Y POTENCIAL PARA SUBESTACIONES DEL SISTEMA ELÉCTRICO NACIONAL**, presentado por el estudiante universitario: **José Isabel Chalí Mux**, y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, se autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE.

Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco  
Decano



Guatemala, enero de 2018

/cc

## **ACTO QUE DEDICO A:**

<b>Dios</b>	Por la vida, salud, sabiduría y fuerzas para alcanzar cada una de mis metas en el transcurso del tiempo
<b>Mis padres</b>	José Chalí y Victoria Mux, por amor y su apoyo incondicional, dándome el ejemplo para ser mejor persona cada día, porque de una u otra manera me ayudaron a que este logro fuese posible.
<b>Mis hermanos</b>	Erick, Celina, Verónica, Elisabeth y Carlos, por brindarme su apoyo, cariño y alegría en el transcurso de esta etapa.
<b>Mis tías y tíos</b>	Por su cariño, apoyo y comprensión.
<b>Mis amigos</b>	Por su amistad y apoyo en el transcurso de estos años en la Facultad, aconsejándome a seguir siempre adelante para alcanzar las metas.

## **AGRADECIMIENTOS A:**

<b>Universidad de San Carlos de Guatemala</b>	Por permitir que me formara como profesional durante el tiempo que permanecí en sus instalaciones.
<b>Facultad de Ingeniería</b>	Por ser parte de ella, adquiriendo conocimientos y habilidades para desempeñarme como profesional.
<b>Asesor</b>	Ingeniero Fernando Alfredo Moscoso Lira, por su tiempo y colaboración profesional en la realización de este trabajo de graduación.
<b>Catedráticos</b>	A cada uno de los catedráticos de la Universidad de San Carlos que nos transmitieron sus conocimientos y experiencias durante el tiempo de formación.

## ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	V
LISTA DE SÍMBOLOS .....	IX
GLOSARIO .....	XI
RESUMEN.....	XIII
OBJETIVOS.....	XV
INTRODUCCIÓN .....	XVII
1. TRANSFORMADORES DE INSTRUMENTO .....	1
1.1. Historia y evolución de los transformadores de instrumento .....	1
1.2. Evolución del transformador de instrumento: punto de vista dieléctrico .....	2
1.3. Transformadores de instrumento.....	3
1.4. Transformadores de corriente .....	4
1.4.1. Errores en los CT.....	7
1.4.2. Régimen de funcionamiento .....	10
1.5. Transformador de voltaje.....	11
1.5.1. El transformador de voltaje inductivo.....	12
1.5.2. Transformadores de voltaje capacitivo .....	14
1.5.3. Errores en los transformadores de voltaje .....	17
1.6. Transformadores combinados de corriente y de tensión .....	20
1.7. Factores por considerar en los transformadores de instrumento.....	21
1.7.1. Tensión nominal y nivel básico de aislamiento al impulso (BIL).....	21
1.7.2. Condiciones ambientales.....	23

1.7.3.	Niveles de aislamiento .....	27
1.7.4.	Condiciones de operación .....	28
2.	TRANSFORMADORES DE INTENSIDAD.....	29
2.1.	Tipo de transformador de corriente .....	29
2.2.	Intensidades primarias asignadas.....	30
2.3.	Intensidades secundarias asignadas .....	32
2.4.	Intensidades de calentamiento.....	32
2.5.	Potencias de precisión .....	35
2.6.	Intensidades de cortocircuito.....	36
2.7.	Marcado de bornes y polaridad.....	37
2.8.	Placa de datos .....	39
2.9.	Transformadores de intensidad para medida .....	41
2.9.1.	Clase de precisión.....	42
2.9.2.	Índice de corriente extendida IEC .....	43
2.9.3.	Límite de error de relación en los transformadores de intensidad para medida .....	44
2.10.	Transformadores de intensidad para protección .....	48
2.10.1.	Clase de precisión.....	49
2.10.2.	Límites de error de relación en los transformadores de intensidad para protección .....	51
2.11.	Transformadores de intensidad para protección donde es esencial la respuesta en régimen transitorio IEC .....	54
2.11.1.	Carga.....	56
2.12.	Resistencia a cortocircuito .....	57
2.13.	Intensidad límite térmica (Iterm).....	58
2.14.	Intensidad límite dinámica (Idin).....	59
2.15.	Funcionamiento del TI a circuito abierto.....	60
2.16.	Elección del transformador de corriente.....	60

3.	TRANSFORMADORES DE TENSIÓN.....	63
3.1.	Selección del tipo .....	63
3.2.	Voltajes primarios asignados.....	64
3.3.	Tensión nominal secundaria.....	70
3.4.	Relación de transformación .....	70
3.5.	Potencia de precisión .....	71
3.6.	Factores de tensión .....	72
3.7.	Límite de calentamiento.....	73
3.8.	Polaridad y marcado de terminales .....	74
3.9.	Placa de datos.....	75
3.10.	Resistencia de transformadores de tensión a cortocircuitos....	76
3.11.	Transformadores de tensión para medida.....	76
3.11.1.	Clase de precisión .....	77
3.11.2.	Límites de error de relación en los transformadores de tensión para medida. ....	78
3.12.	Transformadores de tensión para protección .....	80
3.12.1.	Clase de precisión .....	81
3.12.2.	Carga.....	82
3.12.3.	Límite de error de relación en los transformadores de tensión para protección.....	82
3.13.	Transformadores de tensión de realización especial.....	83
3.13.1.	Transformadores con varias tensiones primarias nominales .....	83
3.13.2.	Transformadores con varias tensiones secundarias nominales .....	84
3.13.3.	Transformadores en cascada .....	85
3.13.4.	Transformadores con varios arrollamientos secundarios .....	85
3.14.	Transformadores de tensión para descarga de líneas .....	86

3.15.	Sobretensiones .....	88
3.15.1.	Ferromresonancia serie .....	89
3.15.2.	Ferromresonancia paralelo .....	90
3.16.	Funcionamiento del transformador de tensión con el secundario en cortocircuito .....	91
3.17.	Elección del transformador de tensión .....	92
4.	OTROS TIPOS DE TRANSFORMADORES DE MEDIDA .....	95
4.1.	Transformadores de medida electrónicos .....	95
4.1.1.	Transformadores de intensidad electrónicos .....	96
4.1.2.	Transformadores de tensión electrónicos .....	97
4.2.	Transformadores de medida para subestaciones blindadas ....	99
4.3.	Especificaciones de transformadores de instrumento para medida según la normativa del AMM en Guatemala.....	99
CONCLUSIONES .....		103
RECOMENDACIONES .....		105
BIBLIOGRAFÍA.....		107

# ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

## FIGURAS

1.	Conexión de un transformador de corriente .....	4
2.	Trasformadores de corriente: uno y dos devanados secundarios .....	5
3.	Curvas de saturación de distintos núcleos .....	6
4.	Diversos tipos de TI.....	7
5.	Circuito simplificado del lado secundario CT's.....	8
6.	Diagrama equivalente de vectores.....	9
7.	Diagrama de error de corriente y fase.....	9
8.	Zonas de funcionamiento de transformadores de medición y protección.....	11
9.	Conexión de transformador de voltaje.....	12
10.	Transformador de tensión inductivo conectado en cascada .....	13
11.	Esquema de un transformador de voltaje capacitivo.....	15
12.	Diagrama equivalente del TTC.....	16
13.	Diagrama simplificado de un transformador de tensión .....	17
14.	Representación vectorial de los tres voltajes .....	18
15.	Diagrama de error de corriente y error de fase. ....	19
16.	Transformador combinado .....	21
17.	Factor de corrección de altitud IEC 60044-1 .....	26
18.	Relación de intensidades primaria y secundaria .....	42
19.	Comparación de transformadores de corriente de medición.....	48
20.	Conexión típica del primario grupo 1 .....	65
21.	Conexión típica del primario grupo 2.....	66
22.	Conexión típica del primario grupo 3.....	67
23.	Conexión típica del primario grupo 4.....	68
24.	Conexión típica del primario grupo 5.....	69

25.	Límites de error clase de precisión 0,5 y 1 .....	79
26.	Límites de clase de exactitud para TT de medición .....	80
27.	Transformador de tensión, periodo transitorio .....	87
28.	Ferroresonancia en serie .....	89
29.	Ferroresonancia paralelo .....	90
30.	Conexión para amortiguar la ferro-resonancia paralelo .....	91
31.	Transformador de intensidad electrónico .....	96
32.	Principio básico transformador de intensidad electrónico .....	97
33.	Principio de un transformador de tensión electrónico. ....	98

## TABLAS

I.	Niveles básicos de aislamiento .....	23
II.	Factor de corrección del esfuerzo dieléctrico para transformadores instaladas a alturas mayores de 1000 msnm.....	24
III.	Categorías de temperatura .....	27
IV.	Distancia de fuga .....	28
V.	Corrientes nominales de una o dos relaciones .....	31
VI.	Transformadores de corriente relación múltiple .....	31
VII.	Intensidad nominal de calentamiento.....	33
VIII.	Límite de incremento de temperatura de los devanados .....	33
IX.	Límite de incremento de temperatura IEEE/ANSI.....	34
X.	Burdens estándares para TI con 5A en el secundario. ....	35
XI.	Equivalencias aproximadas entre cargas IEC e IEEE .....	36
XII.	Marcado de terminales IEC 60044-1 .....	38
XIII.	Guía de aplicación de TC .....	43
XIV.	Límite de error de relación y fase para TI de medición .....	45
XV.	Límites de error de corriente y desplazamiento de fase (clases de 0,1 a 1).....	46

XVI.	Límites de error de corriente y error de fase (gama extendida) .....	46
XVII.	Límites de error de relación clase 3 y 5.....	47
XVIII.	Error de relación de transformadores de intensidad de protección .....	52
XIX.	Límites de error de relación transformadores TI protección .....	53
XX.	Voltaje secundario y burden estándar TC clase C y T .....	54
XXI.	Tensiones primarias asignadas.....	64
XXII.	Grupo 1, Voltajes primarios nominales y relación .....	65
XXIII.	Grupo 2, Voltajes primarios nominales y relación .....	66
XXIV.	Grupo 3, Voltajes primarios nominales y relación .....	67
XXV.	Grupo 4, Voltajes primarios nominales y relación .....	68
XXVI.	Grupo 5, Voltajes primarios nominales y relación .....	69
XXVII.	<i>Burdens standard</i> para transformadores de voltaje IEEE/ANSI .....	72
XXVIII.	Valores normales del factor de tensión asignado.....	73
XXIX.	Marcado de terminales IEC 60044-1 .....	74
XXX.	Guía de aplicación de transformadores de voltaje .....	77
XXXI.	Límites de error de voltaje y desfase de transformadores de voltaje para medición.....	78
XXXII.	Límites de error de relación.....	79
XXXIII.	Límites de error de voltaje y desfase de transformadores de voltaje para protección.....	83
XXXIV.	Clase de precisión PT y CT tensiones mayores a 69 kV.....	100
XXXV.	Clase de precisión PT y CT tensión igual o menor a 69 kV .....	100



## LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
<b>A</b>	Amperio
<b>C</b>	Capacitancia
<b>kV</b>	Kilo voltio
<b>kW</b>	Kilo vatio
<b>L</b>	Inductancia
<b>Hz</b>	Hertz
<b>I</b>	Corriente, Intensidad
<b>I1, Ip</b>	Corriente primaria
<b>I2, Is</b>	Corriente secundaria
<b>Ie</b>	Corriente de excitación
<b>P</b>	Potencia
<b>P</b>	Bornes primarios normativa IEC
<b>R</b>	Resistencia
<b>S</b>	Bornes secundarios normativa IEC
<b>SF<sub>6</sub></b>	Hexafloruro de azufre
<b>Tgδ</b>	Tangente delta
<b>U1, V1, Up, Vp</b>	Voltaje primario
<b>U2, V2, Us, Vs</b>	Voltaje secundario
<b>V</b>	Voltaje, voltio
<b>VA</b>	Voltio-amperio
<b>Z</b>	Impedancia



## GLOSARIO

<b>AMM</b>	Administrador de Mercado Mayorista.
<b><i>BIL</i></b>	<i>Basic Impulse Level.</i>
<b>Burden</b>	Carga en el devanado secundario.
<b>Ct's, TC, TI</b>	Transformador de corriente (intensidad).
<b>Fs</b>	Factor de seguridad.
<b>Icc</b>	Corriente de cortocircuito.
<b>Idin</b>	Corriente dinámica.
<b><i>IEC</i></b>	<i>International Electrotechnical Commission.</i>
<b><i>IEEE</i></b>	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers.</i>
<b>Ik</b>	Corriente máxima de excitación a Vk.
<b>In</b>	Corriente nominal.
<b>Iterm</b>	Corriente térmica.
<b>N1</b>	Número de vueltas del devanado primario

<b>N2</b>	Número de vueltas del devanado secundario.
<b>NBI</b>	Nivel básico al impulso.
<b>nsnm</b>	Metros sobre el nivel del mar
<b>PDC</b>	<i>Polarization and depolarization direct current</i> (Polarización y despolarización con corriente continua).
<b>Rct</b>	Resistencia máxima secundaria permisible corregida a 75 °C con medición a corriente continua.
<b>TM</b>	Transformador de medida.
<b>TT, PT</b>	Transformador de tensión.
<b>TTC</b>	Transformador de tensión capacitivo.
<b>TTI</b>	Transformador de tensión inductivo.
<b>Vk</b>	Voltaje del punto de saturación.

## **RESUMEN**

Este trabajo presenta los requerimientos mínimos para la selección y especificación de los transformadores de instrumento, utilizados en el sistema eléctrico nacional, definiendo claramente los utilizados para protección y medición y las diferencias que tienen entre cada una.

Los transformadores de instrumento, tanto de tensión y de intensidad pueden especificarse bajo las normativas internacionales, ya sea la IEC o la IEEE, las cuales establecen una serie de especificaciones importantes para su utilización dependiendo del uso que se requiera También establecen los errores máximos admisibles al momento de utilizarse.

Asimismo, muestra los requerimientos de la CNEE y del AMM al momento que se quiera utilizar un equipo de instrumento para el área comercial, los cuales deberán cumplir acorde con lo especificado en las normas nacionales.



## **OBJETIVOS**

### **General**

Elaborar una guía para la selección y especificación de transformadores de instrumento efectivamente para el sistema eléctrico nacional.

### **Específicos**

1. Diferenciar claramente la utilización y aplicación de los transformadores de instrumento de potencial y corriente.
2. Definir los posibles escenarios de trabajo de los transformadores de instrumento, tanto para medición como protección dentro de una Subestación.
3. Realizar e identificar las especificaciones necesarias de los transformadores de voltaje, de acuerdo con su utilización.
4. Realizar e identificar las especificaciones de selección de los transformadores de corriente, de acuerdo con su aplicación.
5. Realizar un proceso de selección y especificación de transformadores de instrumento.
6. Definir las buenas prácticas técnicas de selección de transformadores de instrumento de los transportistas de electricidad de Guatemala.



## INTRODUCCIÓN

El presente trabajo es un estudio para la especificación correcta al momento de seleccionar un transformador de instrumento para Subestaciones del Sistema Eléctrico Nacional, el cual puede ser utilizado para elegir alguno de estos dispositivos, por las empresas eléctricas del medio nacional y toda entidad que requiera algún documento de apoyo, teniendo un mayor criterio al momento en que sea necesario utilizarlos.

Los transformadores de medición son utilizados ampliamente en distintas áreas del sistema eléctrico de Guatemala, tanto para medición como para protección de los aparatos eléctricos que se requieran proteger o medir los distintos parámetros eléctricos que se deseen llevar un control, sin que estos tengan grandes errores de medición que lleven a producir fallas. El estudio busca mostrar una guía práctica y efectiva donde se encuentre los criterios mínimos para la selección de algún transformador instrumento de acuerdo a los requerimientos del usuario, donde especifique su uso ideal manteniéndose dentro de los márgenes de error, para una adecuada utilización generando seguridad en el control de medición y protección.

Se investigó la evolución y desarrollo de transformadores instrumentos durante el transcurso de su desarrollo en la historia teniendo en cuenta los factores de su evolución tecnológica de acuerdo a su fabricación. Esta guía se realizó teniendo como base a las normas internacionales de transformadores de instrumentos ANSI-IEEE y la IEC, donde se realiza un análisis comparativo determinando las diferencias y coincidencias de las mismas, el cual puede ser

utilizado por distintas empresas que podrán acceder especificaciones de selección de transformadores confiablemente.

# **1. TRANSFORMADORES DE INSTRUMENTO**

## **1.1. Historia y evolución de los transformadores de instrumento**

Aparecieron el siglo pasado en Alemania cubriendo las necesidades elementales de medición, y con el crecimiento de las redes eléctricas, aumentó también su complejidad llegando a ser indispensables en las distintas redes eléctricas que actualmente existen, confirmando la evolución del control y medición eléctrica.

Las centrales eléctricas: hidráulicas, térmicas, solares, eólicas etcétera, están interconectados entre los consumidores y generadoras a través del sistema Eléctrico Nacional de transporte y distribución, la red no es de uso propio de una compañía ni siquiera de un solo país. Guatemala está interconectada con México, Honduras y El Salvador, y para monitorear es necesario medir continuamente los intercambios de energía que se encuentran en estos puntos: salidas de centrales generadoras y los puntos de consumo, entradas y salidas que conforman en cada subestación de transformación y distribución donde las mediciones tienen un objetivo económico con efectos de facturación.

También hay otro objetivo técnico de protección, que es el estar atento a no sobrecargar las líneas, para que no se produzcan fallas en la, es decir que lo que se busca es tener una optimización en la generación y distribución de una forma segura y económica.

## **1.2. Evolución del transformador de instrumento: punto de vista dieléctrico**

Desde el punto de vista dieléctrico, el transformador de medida, evoluciona de acuerdo a los nuevos materiales y exigencias que se tienen. A continuación, se analiza la clasificación de los TM donde Artech considera los siguientes: a) baja tensión; b) media tensión y c) alta y muy alta tensión.

En baja tensión el problema del dieléctrico es muy pequeño, los aislantes dependen de clase térmica, resistencia mecánica. Los materiales podrían ser cintas aislantes (p.e., Mylar), resinas epoxi y poliuretano para TM moldeados, materiales termoplásticos (ABS, etc.) y termoendurecibles (resinas fenólicas, etc.) para carcasa, etcétera.

En media tensión (hasta 72,5 kV) en servicio interior, las resinas sintéticas permiten reducir notablemente el tamaño de los TM al cumplir las funciones de aislar el primario, del núcleo y del secundario y constituir la superficie aislante entre alta tensión y baja tensión en contacto con el aire.

En el servicio intemperie, las resinas cicloalifáticas han sustituido parcialmente a la porcelana, debido a su elevada resistencia a las corrientes superficiales y a la posibilidad de conseguir gran línea de fuga, por lo cual son adecuadas para servicio intemperie, salvo en condiciones de fuerte polución atmosférica de tipo conductor. En caso de utilizar como aislante exterior la porcelana, en los TI, el asilamiento interior normalmente es de resina epoxi.

En los TT se utiliza aceite mineral como aislante interior, debido a la excelente impregnación de las bobinas y en el caso de utilizar resina como aislante exterior, se utiliza gas aislante ( $SF_6$ ) para impregnar las bobinas. Se debe

tener en cuenta que para evitar las descargas parciales (DP) el aislamiento principal debe carecer de poros, lo que resulta difícil en las bobinas de los TT si la impregnación no es adecuada.

En alta y muy alta tensión el aislamiento externo es de porcelana o bien de un aislante compuesto de fibra de vidrio y aletas de silicona, y el aislamiento interno es de papel-aceite o gas  $SF_6$ .

Es importante tener en cuenta que en el aislamiento papel-aceite, el secado del papel y la impregnación de aceite con un buen procedimiento de secado se puede conseguir niveles de DP muy por debajo de lo que exigen las normas y el valor de  $Tg\delta$  menor que 0,3 %.<sup>1</sup>

### **1.3. Transformadores de instrumento**

Son transformadores con características especiales de medición, reduciendo los valores de voltaje y corriente, del punto donde están conectados a valores proporcionales al cual se quieran utilizar. (Los valores obtenidos son más pequeños a la de la red).

Funciones de los transformadores de instrumento:

- Proveer aislamiento entre los voltajes primario y los voltajes que utilizan los instrumentos de medición.
- Reproducir las condiciones de tensión e intensidad que se presentan en el Sistema Eléctrico (por lo menos en determinada zona).

---

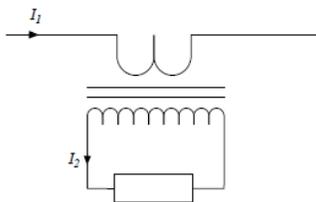
<sup>1</sup> Electrónica Artech Hermanos S.A. *Introducción a los transformadores de medida*. p. 38.

- Reducir los valores de tensión e intensidad que se encuentran en el devanado primario a niveles de voltaje o corriente a un valor que pueda ser utilizado por los instrumentos, (generalmente 115-120 voltios para transformadores de voltaje y 1 o 5 amperios para transformadores de corriente).

#### 1.4. Transformadores de corriente

Su función es la de transformar la corriente del circuito primario a un valor normalizado que se aplica a los diferentes dispositivos de medición y protección que están en el circuito secundario.

Figura 1. **Conexión de un transformador de corriente**

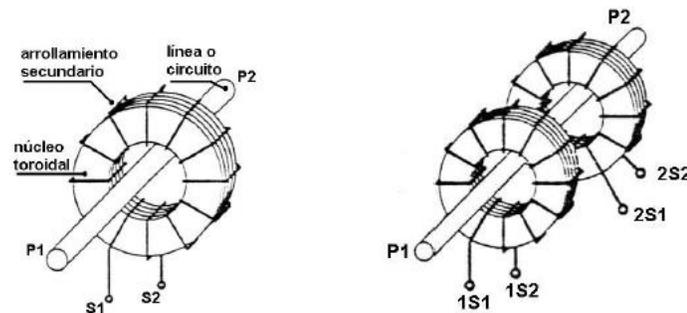


Fuente: Instrument Transformers Application Guide. [http://www.cigre.nl/media/38693/application\\_guide\\_stroomtransformatoren.pdf](http://www.cigre.nl/media/38693/application_guide_stroomtransformatoren.pdf). Consulta: julio de 2015.

El devanado primario puede ser de una o varias espiras que se pueden dividir en partes iguales para conectarse en serie o en paralelo para cambiar su relación. Estas espiras atraviesan el núcleo magnético, que usualmente es toroidal, que puede tener cierto entrehierro, donde se arrolla el devanado secundario para minimizar el flujo de dispersión. El devanado secundario se encarga de energizar los circuitos de intensidad de uno o varios aparatos de medición que se conectan en serie. El transformador de corriente puede tener varios devanados secundarios, con un circuito magnético independiente, donde uno puede ser utilizado para medida y otro para protección, por lo que se

comporta como si fueran varios transformadores diferentes. Es recomendable utilizar transformadores de corriente independientes para protección diferencial de cables o transformadores de potencia.

Figura 2. **Trasformadores de corriente: uno y dos devanados secundarios**

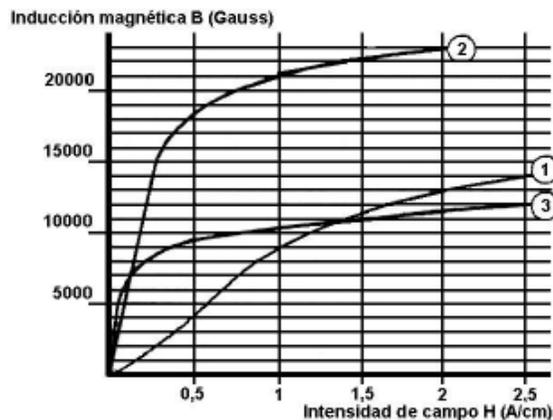


Fuente: <http://gama.fime.uanl.mx/~omeza/pro/SE/5.pdf>. Consulta: mayo de 2015.

Los CT's utilizados en protecciones con relés digitales necesitan de núcleos que tengan menores saturaciones que los relés de clase electromagnético, porque las velocidades de respuesta de las protecciones electrónicas son más rápidas. Los transformadores de corriente pueden ser de medición, de protección, mixtos o combinados.

Núcleo: se construye de chapa magnética de gran permeabilidad. Para transformador de medida se utiliza una chapa de saturación rápida, y para uno de protección una chapa de saturación lenta:

Figura 3. **Curvas de saturación de distintos núcleos**



Fuente: <http://gama.fime.uanl.mx/~omeza/pro/SE/5.pdf> . Consulta: julio de 2015.

- Chapa con alto porcentaje de silicio curva 1.
- Chapa de aleación ferromagnética a base de níquel (30 % al 70 %) de gran permeabilidad magnética y débil poder de saturación curva 2.
- Chapa de aleación ferromagnética a base de níquel (30 % al 70 %) de gran permeabilidad magnética pero con gran poder de saturación curva 3.

Las chapas de las curvas 2 y 3 se llaman comercialmente Mu – metal o Permalloy.

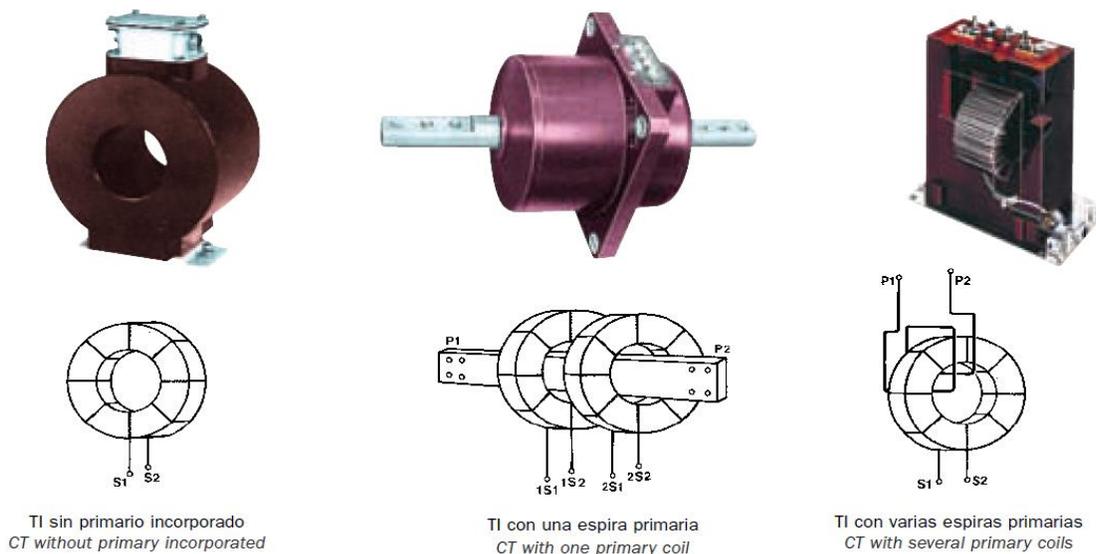
Al utilizar una chapa de gran permeabilidad y saturación rápida en CT de medida se obtiene una buena precisión en corrientes primarias no superiores al 120 % de su corriente nominal, y también no transfieren al secundario sobreintensidades y cortocircuitos.<sup>2</sup>

<sup>2</sup> *Módulo ii transformadores de instrumento.*  
<http://gama.fime.uanl.mx/~omeza/pro/SE/5.pdf>. p. 4. Consulta: julio de 2015.

Asimismo, se utiliza una chapa de gran permeabilidad y saturación lenta para CT de protección, se obtiene una relación de transformación que se mantiene para valores de intensidad primaria de varias veces la corriente nominal, con lo que se tienen valores proporcionales en el secundario de sobrecargas y cortocircuitos para activar los dispositivos de protección.

El núcleo de los transformadores de corriente usualmente es de forma toroidal repartido uniformemente en el devanado secundario para reducir al mínimo el flujo de dispersión. A continuación se muestran diversos tipos de transformadores de corriente:

Figura 4. **Diversos tipos de TI**



Fuente: *Introducción a los transformadores de medida. Artech*. Consulta: agosto 2015.

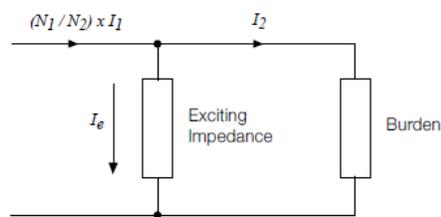
### 1.4.1. Errores en los CT

Si la corriente de excitación pudiese ser despreciada, el transformador debería reproducir la corriente primaria sin errores:

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

Pero en realidad esto no es posible, el circuito simplificado en el lado secundario es:

Figura 5. **Circuito simplificado del lado secundario CT's**



Fuente: Instrument Transformers Application Guide. [http://www.cigre.nl/media/38693/application\\_guide\\_stroomtransformatoren.pdf](http://www.cigre.nl/media/38693/application_guide_stroomtransformatoren.pdf). Consulta: julio de 2015.

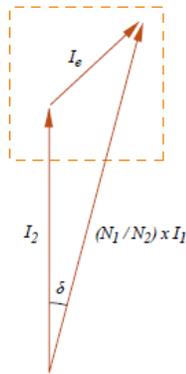
El diagrama muestra que no toda la corriente primaria pasa a través del circuito secundario. Parte de este es consumido por el núcleo, por lo que la corriente primaria no es transformada exactamente:

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

El error aparece tanto en amplitud como en fase. El error en amplitud es llamado error de corriente o relación y el error en fase es llamado error de fase o desplazamiento de fase.

En la figura 6 se muestra el diagrama equivalente de la representación de las tres corrientes.

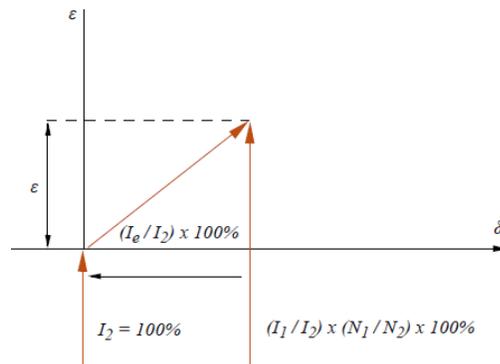
Figura 6. Diagrama equivalente de vectores



Fuente: *Instrument Transformers Application Guide*. [http://www.cigre.nl/media/38693/application\\_guide\\_stroomtransformatoren.pdf](http://www.cigre.nl/media/38693/application_guide_stroomtransformatoren.pdf). Consulta: julio de 2015.

En la figura 7 la corriente secundaria ha sido escogida como referencia en una dimensión de 100 %. Además, un sistema de coordenadas con los ejes divididos en porcentajes ha sido construido con el origen de coordenadas sobre el vector de referencia. Puesto que  $\delta$  es un ángulo pequeño, el error de corriente  $\varepsilon$  y el error de fase  $\delta$  podrían leerse directamente en porcentaje sobre ejes ( $\delta = 1\% \text{ centiradian} = 34.4 \text{ minutos}$ )

Figura 7. Diagrama de error de corriente y fase



Fuente: *Instrument Transformers Application Guide*. [http://www.cigre.nl/media/38693/application\\_guide\\_stroomtransformatoren.pdf](http://www.cigre.nl/media/38693/application_guide_stroomtransformatoren.pdf). Consulta: julio de 2015.

El error de corriente es positivo si la corriente del primario es muy alta, y el error de fase es positivo si la corriente del secundario adelanta al primario.

#### **1.4.2. Régimen de funcionamiento**

Se distinguen básicamente dos regímenes de funcionamiento:

- Normal: los valores corresponden a valores por debajo o semejantes a la corriente nominal de la red.
- Sobreintensidad: esto sucede cuando existen corrientes de fallas como cortocircuitos, fallas de aislamiento, fallas por maniobra, en las cuales aparecen corrientes de varias veces la corriente nominal del circuito, por lo que el transformador debe soportar estas condiciones a la que se está expuesto, sin afectar sus características normales de operación.

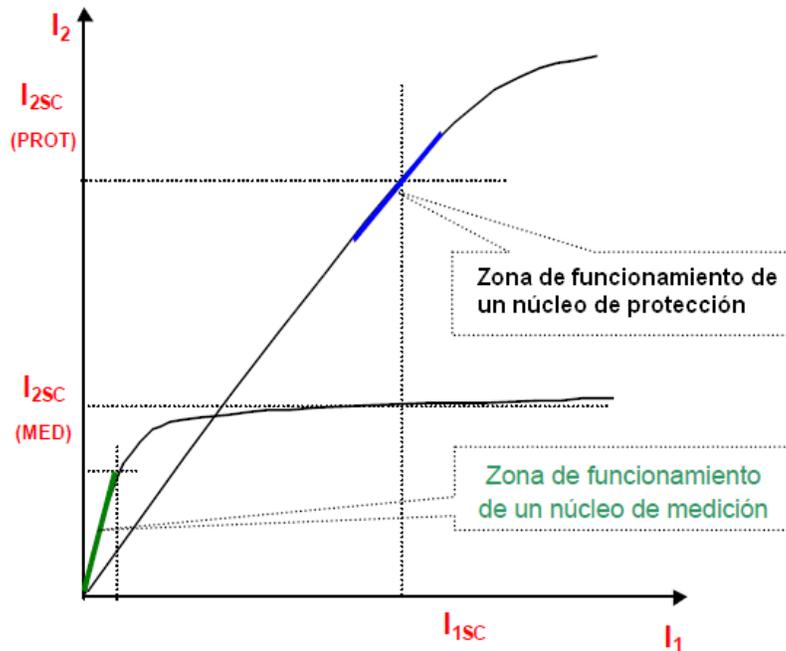
Los transformadores de corriente utilizados para medición requieren de una mejor exactitud en condiciones normales de operación, y los que se utilizan para protección requieren tener un grado de exactitud en condiciones de corriente de falla. Al realizar un sistema de medición en la región normal, la corriente secundaria debe limitarse a un valor máximo para evitar que los dispositivos de medición no sean dañados por las altas corrientes debido a la sobrecorriente.

Si se realiza un sistema de protección, es necesario establecer un rango superior de trabajo de sobreintensidad que reproduzca adecuadamente la corriente de falla del primario al secundario, en el régimen de sobreintensidad donde los aparatos de protección actúen.<sup>3</sup>

---

<sup>3</sup> ARGAÑARAZ, José Hugo. *Transformadores de medida*. <http://documents.tips/documents/lme1-nc04-instrumentacion-transformadores-de-medida.html>. p. 4. Consulta: agosto de 2015.

Figura 8. **Zonas de funcionamiento de transformadores de medición y protección**



Fuente: <http://documents.tips/documents/lme1-nc04-instrumentacion-transformadores-de-medida.html>. Consulta: agosto de 2015.

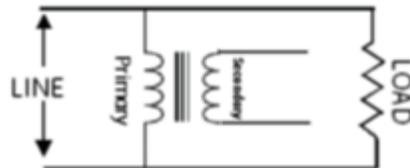
### 1.5. Transformador de voltaje

Reduce el nivel de voltaje de un circuito primario para suministrar el valor ideal a los instrumentos de medición o relés de protección. En condiciones normales el voltaje proporcionado a los instrumentos (tensión secundaria) es proporcional al voltaje primario del cual está desfasado un ángulo cercano a cero.

El devanado primario se conecta en paralelo con el circuito a controlar y el secundario en paralelo con los distintos aparatos de medición y protección que se quieran conectar, por lo que un transformador de potencial sus terminales

primarios se podrán conectar de fase a tierra o a un par de fases y sus terminales secundarios a los dispositivos que se conectarán.<sup>4</sup>

Figura 9. **Conexión de transformador de voltaje**



Fuente: Digital Energy. *Instrument Transformer Basic Technical Information and Application*.  
p.44.

Los transformadores de potencial pueden ser inductivos o capacitivos.

### 1.5.1. El transformador de voltaje inductivo

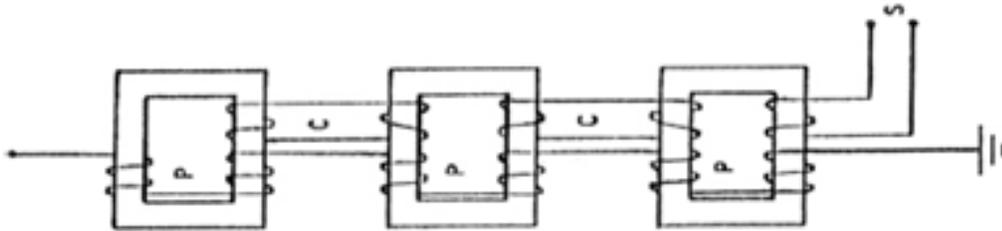
Tiene el devanado primario y secundario sobre un núcleo magnético en común, y su tamaño depende de la tensión del sistema y el aislamiento del devanado primario el cual debe soportar sobretensiones que se presenten en la red, incluso las de impulso de maniobra.

Usualmente un transformador de tensión inductivo tiene un solo devanado primario, el cual presenta problemas de aislamiento para voltajes arriba de los 130 kV por lo que para evitar estos inconvenientes se fabrican transformadores de tensión inductivo en cascada dividiendo la tensión primaria en varias etapas.

---

<sup>4</sup> Módulo ii transformadores de instrumento  
.http://gama.fime.uanl.mx/~omezapro/SE/5.pdf. p. 17. Consulta: julio de 2015.

Figura 10. **Transformador de tensión inductivo conectado en cascada**



Fuente: Módulo II transformadores de Instrumento.

<http://gama.fime.uanl.mx/~omeza/pro/SE/5.pdf>. Consulta: agosto de 2015.

En la figura 10 se muestra el esquema de un transformador inductivo conectado en cascada, el cual se ve que está conectado en serie, donde los devanados primarios (P) están repartidos en los dos lados del núcleo, mientras que el devanado secundario (S) solamente se realiza en la última etapa.

Los arrollamientos de acoplamiento (C), que se conectan entre los transformadores, aseguran la transferencia de la fuerza magnetomotriz entre cada uno de estos para que el voltaje se distribuya uniformemente en todos los devanados primarios. El voltaje de los arrollamientos de acople y de los núcleos son ajustados a valores predeterminados conectándolos a puntos específicos del primario para que el aislamiento de cada sección sea suficiente para la tensión que se desarrollara en esta.

El aislamiento entre las distintas etapas se consigue por medio de conjuntos de transformadores individuales, los cuales deben soportar el voltaje nominal de la red.

Los transformadores de potencial capacitivo fueron desarrollados debido al alto costo de los transformadores de tensión inductivo, principalmente para

voltajes arriba de los 100 kV, pero estos no tienen buena respuesta transitoria como los de tensión inductivo.

Núcleo: sus fabricaciones generalmente son de chapas magnéticas de alta permeabilidad y rápida saturación, tanto para medición como para protección, el cual mantiene una relación de transformación constante. La utilización de estos núcleos es debido que en la red eléctrica no se presentan grandes variaciones de voltaje contrario a las variaciones de corriente, por lo que no es necesario utilizar núcleos de permeabilidad alta y curva de saturación lenta donde mantienen su relación a varias veces su corriente nominal del primario.

Además, la utilización de núcleos de saturación lenta ocasionaría que cuando ocurran sobretensiones en el devanado primario estas se transferirán al devanado secundario dañando a los equipos de medición que se encuentren conectado a este.<sup>5</sup>

### **1.5.2. Transformadores de voltaje capacitivo**

Son usados mayormente para voltajes arriba de los 100 kV. Su aplicación es el mismo que un transformador de voltaje inductivo.

Los transformadores de voltaje capacitivo se componen de capacitores conectados en serie que forman un divisor de tensión, estas se encuentran dentro de aisladores huecos de porcelana para obtener una tensión intermedia, donde se conecta un transformador de tensión intermedia, igual que uno inductivo, por medio de una inductancia para compensar la reactancia capacitiva del divisor de

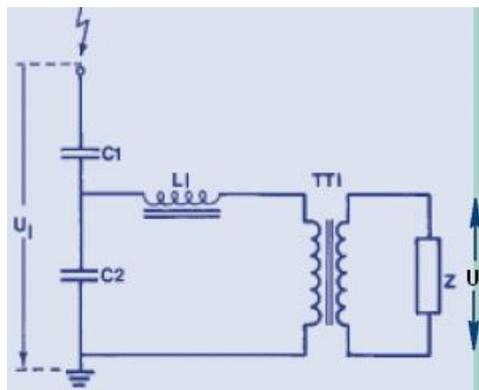
---

<sup>5</sup> *Módulo ii transformadores de instrumento.*  
<http://gama.fime.uanl.mx/~omeza/pro/SE/5.pdf>. p. 21. Consulta: julio de 2015.

voltaje. El transformador puede tener uno o varios secundarios, según sea su aplicación.

En la siguiente figura se muestra un diagrama del circuito de un transformador de tensión capacitivo, donde  $U_1$  es el voltaje del lado primario,  $U_2$  el voltaje del lado secundario,  $C_1$  y  $C_2$  capacitores divisores,  $L_i$  inductancia de compensación,  $TT_i$  transformador de voltaje intermedio, y  $Z$  impedancia de la carga.

Figura 11. **Esquema de un transformador de voltaje capacitivo**



Fuente: Electrónica Artech Hermanos S.A. *Introducción a los transformadores de medida.*

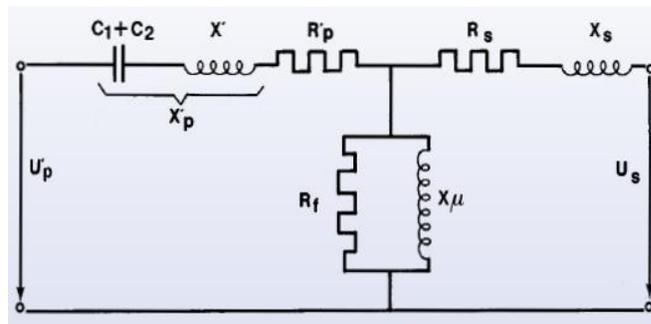
p. 34.

La respuesta en régimen transitorio de este tipo de transformador no es tan rápida como un transformador de voltaje inductivo, por lo que no es recomendable para la utilización con protecciones donde se requiera una mayor velocidad de accionamiento. Un transformador de tensión capacitivo permite utilizarlos en telecomunicaciones por medio de líneas de alta tensión por su especial sintonización de ondas portadoras de alta frecuencia desde 30 Hz a 500

kHz. Por lo que este tipo de transformadores trabaja como transformador de tensión y capacitor de acoplamiento para señales de frecuencias.<sup>6</sup>

Funcionamiento

Figura 12. Diagrama equivalente del TTC



Fuente: Electrónica Artech Hermanos S.A. *Introducción a los transformadores de medida.*

p. 34

En la figura 12 se muestra el diagrama equivalente del TTC donde  $R'_p$ , representa la resistencia de los devanados del TTI y de la inductancia  $L_1$ , las pérdidas en el hierro  $L_1$  y las pérdidas en el dieléctrico de  $C_1$  y  $C_2$  y  $X'_p$  representan la reactancia debido a la capacidad de  $C_1 + C_2$ , a la inductancia  $L_1$  y al primario del TTI. Por lo tanto:

$$U_p = U_1 \frac{C_1}{C_1 + C_2}$$

En estos tipos de transformadores ha de tenerse en cuenta factores que afectan a la precisión, como: variaciones de frecuencia, variaciones de temperatura y estabilidad en el tiempo. La respuesta de un TTC en régimen

<sup>6</sup> Módulo ii transformadores de instrumento.  
<http://gama.fime.uanl.mx/~omeza/pro/SE/5.pdf>. p. 31 Consulta: julio de 2015

transitorio no es tan rápida como la de un TT inductivo, en ocasiones las exigencias de las protecciones rápidas no permiten utilizar un TTC.<sup>7</sup>

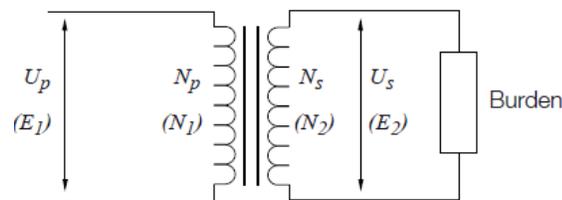
### 1.5.3. Errores en los transformadores de voltaje

El error que introduce un transformador de voltaje en un relevador de protección, no tiene tanta importancia para estos dispositivos a diferencia de los utilizados para la medición, que tienen fines tarifarios. (compra o venta de potencia y energía eléctrica.)

La magnitud del error de un transformador de voltaje depende de:

- El valor de la reactancia serie del circuito equivalente.
- La magnitud de la carga conectada en los terminales del transformador de voltaje (*burden*).

Figura 13. Diagrama simplificado de un transformador de tensión



Fuente:ABB. *Instrument Transformers Application Guide*. [http://www.cigre.nl/media/38693/application\\_guide\\_stroomtransformatoren.pdf](http://www.cigre.nl/media/38693/application_guide_stroomtransformatoren.pdf). Consulta: agosto de 2015.

Si la caída de voltaje pudiese ser despreciada, el transformador debería reproducir el voltaje primario sin errores y la ecuación siguiente debería de aplicarse a los voltajes primario y secundario.

<sup>7</sup> Electrónica Artech Hermanos S.A. *Introducción a los transformadores de medida*. p. 35.

$$U_s = \frac{N_1}{N_2} U_p$$

En realidad, no es posible despreciar la caída de voltaje en la resistencia del devanado y la reactancia de fuga. Por lo que el voltaje primario no es reproducido exactamente. La ecuación entre los voltajes en este caso será:

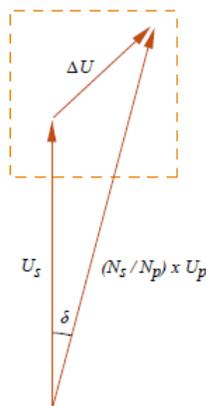
$$U_s = \frac{N_1}{N_2} (U_p - \Delta U)$$

Donde :

$\Delta U$  es la caída de voltaje.

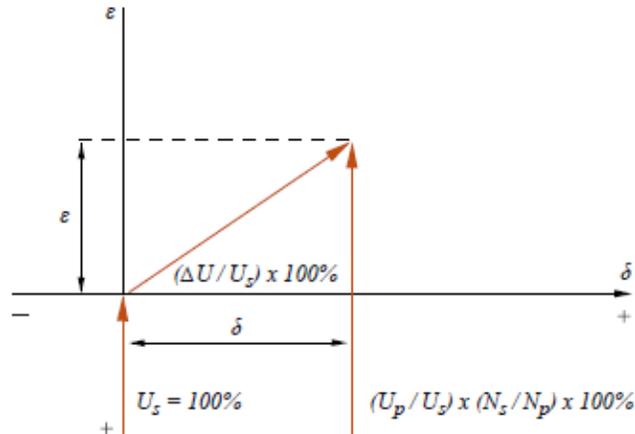
El error en la reproducción aparecerá tanto en fase como en amplitud. El voltaje en amplitud es llamado error de voltaje o error de relación, y el error en fase es llamado error de fase o desplazamiento de fase.

Figura 14. **Representación vectorial de los tres voltajes**



Fuente: ABB. *Instrument Transformers Application Guide*. [http://www.cigre.nl/media/38693/application\\_guide\\_stroomtransformatoren.pdf](http://www.cigre.nl/media/38693/application_guide_stroomtransformatoren.pdf). Consulta: junio de 2015.

Figura 15. Diagrama de error de corriente y error de fase



Fuente: ABB. *Instrument Transformers Application Guide*. [http://www.cigre.nl/media/38693/application\\_guide\\_stroomtransformatoren.pdf](http://www.cigre.nl/media/38693/application_guide_stroomtransformatoren.pdf). Consulta: junio de 2015.

La figura muestra que el secundario ha sido escogido como el vector de referencia en una dimensión de 100 %. Esta es la misma representación de error de ángulo y fase que el del transformador de corriente. El voltaje de error es positivo si el voltaje secundario es muy grande, y el error de fase es positivo si el voltaje secundario adelanta al primario.<sup>8</sup>

- Error de magnitud: es la diferencia entre la relación real y la nominal, está en función del burden conectado y de la reactancia del circuito equivalente.
- Error de ángulo: diferencia entre el ángulo de voltaje primario respecto al ángulo del voltaje secundario.

<sup>8</sup> ABB. *Instrument Transformers Application Guide* - Cigre. [http://www.cigre.nl/media/38693/application\\_guide\\_stroomtransformatoren.pdf](http://www.cigre.nl/media/38693/application_guide_stroomtransformatoren.pdf). Consulta: octubre de 2016. p. 17.

## 1.6. Transformadores combinados de corriente y de tensión

Generalmente, son de tipo exterior utilizados para medición que contienen un transformador de tensión inductivo y uno de corriente, donde su aplicación es la misma que un transformador de corriente y tensión normal, permite el aprovechamiento del espacio y ahorro en estructuras, donde también se tiene un ahorro en tiempo de instalación y mantenimiento.<sup>9</sup>

Esta construcción tiene varias ventajas económicas especialmente en alta tensión, donde la porcelana juega un importante papel en el costo del transformador de medida. Debe tenerse en cuenta la influencia del TI sobre los errores del TT y viceversa. La norma IEC tiene tipificado esta influencia para transformadores combinados.<sup>10</sup>

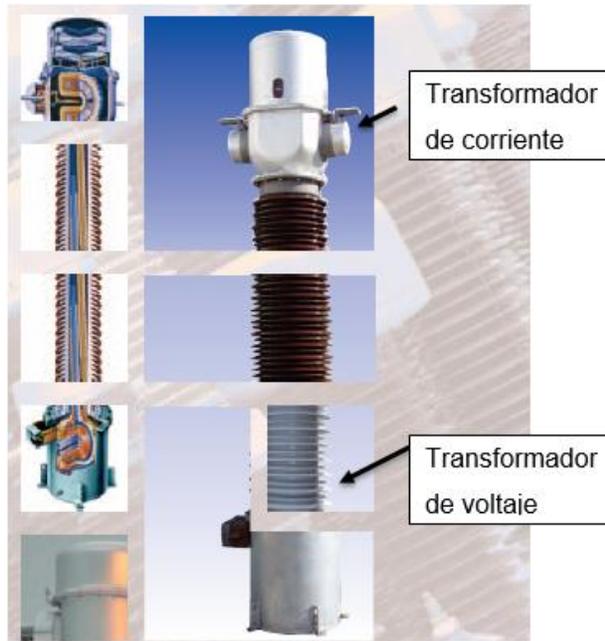
El transformador de corriente puede tener uno o varios núcleos con sus secundarios. El transformador de corriente usualmente está colocado en la parte superior mientras que el de tensión está en la parte de abajo donde sus devanados son diseñados antirresonantes para que su funcionamiento sea ideal, tanto para frecuencia industrial como para fallas transitorias de alta frecuencia.

---

<sup>9</sup> **Arteche.** *Transformadores de medida combinados Combined Instrument Transformes.* <https://www.google.com.gt/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=2&cad=rja&uact=8&ved=0ahUKEwiR3KPUrOjMAhXHJh4KHfPaCNwQFgggMAE&url=http%3A%2F%2Femamid.com%2Fdownload.php%3Fa%3D79260&usg=AFQjCNFQ1kVxQcVhAYZd5QdojO47MiCvRw&sig2=0Q8f2jm97ezWbxlqW3reVw&bv>. p. 3. Consulta: junio de 2015.

<sup>10</sup> Electrónica Arteche Hermanos S.A. *Introducción a los transformadores de medida.* p. 34.

Figura 16. **Transformador combinado**



Fuente: Artech. *Transformadores de medida combinados*. Consulta: enero 2016.

## 1.7. Factores por considerar en los transformadores de instrumento

Estos factores son aplicables tanto para transformadores de tensión, así como transformadores de corriente.

### 1.7.1. Tensión nominal y nivel básico de aislamiento al impulso (BIL)

Los transformadores de instrumento deberán soportar la tensión nominal y las sobretensiones del sistema.

La norma IEEE C57.13 establece que a un transformador de instrumento se deberá asignar un nivel básico de aislamiento al impulso (BIL) para indicar las pruebas dieléctricas de fábrica que el transformador es capaz de soportar.

Además, determina las siguientes excepciones: los voltajes de aislamiento básico al impulso, los voltajes de prueba de tensión aplicada para el aislamiento de los bobinados primarios.

- Pruebas de tensión aplicada para el aislamiento del devanado primario no se aplicarán a los transformadores de tensión que tengan terminal de toma a tierra.
- Para transformadores de tensión con terminal con neutro aislado la prueba de tensión aplicada para el aislamiento del devanado primario deberá ser de 19 kV para transformadores a la intemperie con BIL superior a los 110 Kv. Para transformadores para interior y para los de tipo intemperie con BIL de 110 kV o menos la prueba deberá ser de 10 kV.
- No existe requerimiento de BIL para las terminales neutras de transformadores de voltaje que posea un terminal neutro con toma a tierra o terminal neutro aislado.
- La prueba de tensión aplicada para el aislamiento del devanado secundario y entre múltiples devanados secundarios deberá ser de 2.5 kV.
- La prueba de tensión aplicada para transformadores para uso en los circuitos secundarios del transformador de instrumento deberá ser 2.5 kV.
- La prueba de tensión aplicada para el aislamiento primario de los transformadores de instrumento auxiliar (para uso en los circuitos secundarios del transformador de instrumento) deberá ser de 2.5 kV.
- La tensión de prueba aplicada entre devanados primarios de transformadores de corriente de tres hilos con BIL 10 kV deberá ser de 4 kV.<sup>11</sup>

---

<sup>11</sup> IEEE Power Engineering Society. *IEEE C57.13 Standard Requirements for Instrument Transformers*. p. 5.

Tabla I. Niveles básicos de aislamiento

IEEE/ ANSI				IEC & UNE			
Tensión de Aislamiento kVef	Ensayo frecuencia industrial kVef	Ensayo impulso tipo rayo kVpico	Ensayo impulso tipo maniobra kVpico	Tensión de Aislamiento kVef	Ensayo frecuencia industrial kVef	Ensayo impulso tipo rayo kVpico	Ensayo impulso tipo maniobra kVpico
0,6	4	10	-	0,72	3	-	-
1,2	10	30	-	1,2	6	-	-
2,4	15	45	-	3,6	10	20/40	-
5	19	60	-	7,2	20	40/60	-
8,7	26	75	-	12	28	60/75	-
15	34	95/110	-	17,5	38	75/95	-
25	40/50	125/150	-	24	50	95/125	-
34,5	70	200	-	36	70	145/170	-
46	95	250	-	52	95	250	-
69	140	350	-	72,5	140	325	-
			-	100	185	450	-
115	185/230	450/550	-	123	185/230	450/550	-
138	275	650	-	145	230/275	550/650	-
161	325	750	-	170	275/325	650/750	-
230	395/460	900/1050	-	245	395/460	950/1050	-
			-	300	395/460	950/1050	750/850
			-	362	460/510	1050/1050	850/950
345	575	1300	825	420	570/630	1300/1425	1050/1050
500	750/800	1675/1800	1175	525	630/680	1425/1550	1050/1175

Fuente: Electrónica Artech Hermanos S.A. *Introducción a los transformadores de medida*. p. 44.

### 1.7.2. Condiciones ambientales

- Altitud sobre el nivel del mar

Los esfuerzos dieléctricos del aire disminuyen con la altitud por lo que es importante considerar este aspecto. Por tanto, los transformadores de instrumento que se encuentren en altitudes mayores a 1 000 m.s.n.m., se le deberán aplicar un factor de corrección para la altitud donde estarán instalados. El aislamiento interno no es afectado por la altura.

El valor de capacidad de aislamiento deberá ser por lo mínimo igual al del sistema BIL en el cual operan, adicionalmente deberá corregirse por el factor de

altitud. La norma IEEE C57.13 determina que para los transformadores que operan a altitudes mayores a 1000 m.s.n.m. que no exceden los límites de temperatura establecidos, el valor de la corriente nominal disminuye en un 0,3 % por cada 100 metros superior a los 1 000 m.s.n.m.<sup>12</sup>

Según la normativa IEEE se pueden observar en la siguiente tabla los factores de corrección aplicables, donde la altura máxima para la norma es de 4 500 m.

Tabla II. **Factor de corrección del esfuerzo dieléctrico para transformadores instaladas a alturas mayores de 1 000 msnm**

Altitud (m)	Factor de Corrección por esfuerzo dielectrico
1000	1.00
1200	0.98
1500	0.95
1800	0.92
2100	0.89
2400	0.86
2700	0.83
3000	0.8
3600	0.75
4200	0.7
4500	0.67

Fuente: IEEE C57.13. *Standard Requirements for Instrument Transformers*. p. 4.

Conforme a la norma IEC 60044-1 la distancia de fuga en condiciones ambientales estándar será dado, multiplicando la tensión requerida por el factor k:

$$k = e^{mx(H-1000)/8150}$$

<sup>12</sup> IEEE Power Engineering Society. *IEEE C57.13 Standard Requirements for Instrument Transformers*. p. 5.

Donde:

H= altitud en metros sobre el nivel del mar.

m= 1 para nivel básico de aislamiento al impulso o a frecuencia nominal.

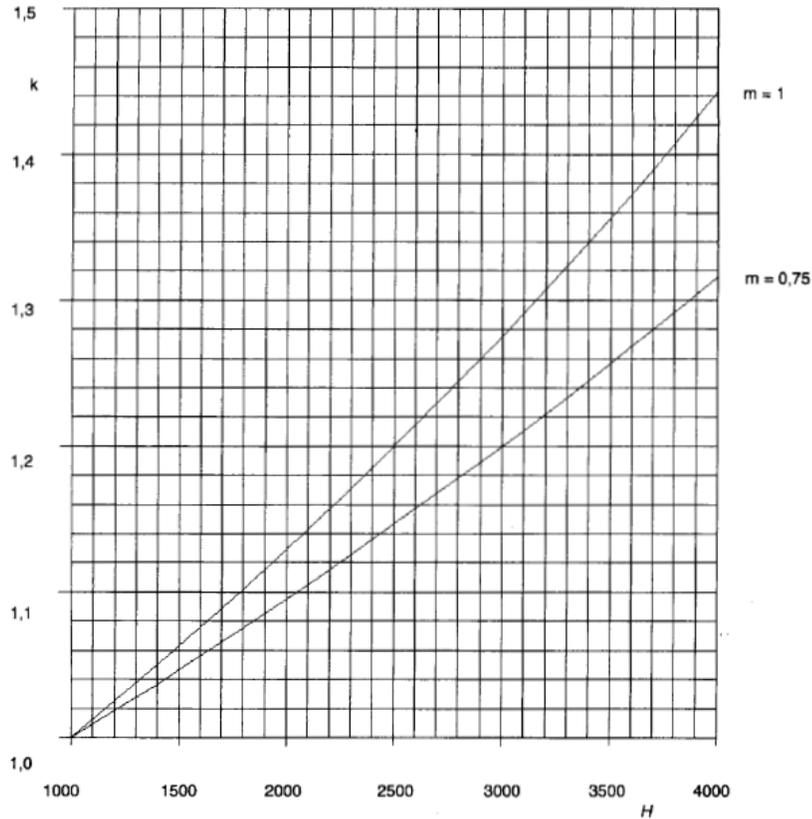
0,75 para nivel básico de aislamiento por maniobra o *switched*.<sup>13</sup>

La siguiente gráfica muestra el factor de corrección por altitud.

---

<sup>13</sup> International Electrotechnical Commission IEC. *Instrument transformers –Part 1: Current transformers*, IEC 60044-1. p. 89.

Figura 17. **Factor de corrección de altitud IEC 60044-1**



Fuente: IEC 60044-1. *Instrument transformers* – Part 1. p. 89.

- Temperatura ambiente

Los transformadores de instrumento se enfrían generalmente por aire. De acuerdo con la norma IEEE C57.13, la temperatura ambiente promedio es de 30°C. Si los transformadores tienen un sistema de refrigeración, el aire no deberá superar los 40°C y la temperatura promedio en 24 horas no debe ser mayor a 30°C.

Los transformadores de instrumento también pueden diseñarse para operar a una temperatura ambiente promedio de 55°C y una temperatura ambiente máxima que no deberá de superar los 65°C. La corriente nominal y la

corriente térmica continua deben ajustarse para temperaturas ambiente promedio por arriba de 30°C.

La IEC especifica tres categorías de temperatura ambiente para las condiciones normales de operación de la siguiente manera:

Tabla III. **Categorías de temperatura**

Categoría	Temperatura mínima (°C)	Temperatura máxima (°C)
-5/40	-5	40
-25/40	-25	40
-40/40	-40	40

Fuente: IEC 60044-1. *Instrument transformers – Part 1: Current Transformers*. p. 29

Donde el valor promedio de la temperatura ambiente, medido en un periodo de 24h, no deberá exceder los 35 °C.<sup>14</sup>

### 1.7.3. Niveles de aislamiento

En la tabla 1 se pueden apreciar los niveles de aislamiento según las distintas normas. La IEC establece las siguientes distancias de fuga de acuerdo al tipo de contaminación del ambiente donde se encuentra el equipo. En la siguiente tabla se muestran los valores mínimos.

---

<sup>14</sup> International Electrotechnical Commission IEC. *Instrument transformers –Part 1: Current transformers*, IEC 60044-1. p. 29.

Tabla IV. **Distancia de fuga**

<b>Nivel de contaminación</b>	<b>Mínima distancia de fuga específica nominal entre fase y tierra (mm/kV entre fases)</b>
I Ligero	16
II Medio	20
III Fuerte	25
IV Muy fuerte	31

Fuente: IEC 60044-1. *Instrument Transformers Part 1: Current Transformers*. p. 33.

Donde la relación de distancia de fuga entre fase y tierra debe ser sobre los valores rms del máximo voltaje que se puede presentar en el sistema fase-fase.

La IEEE/ANSI cuenta con una tabla con los valores predeterminados acorde con los voltajes máximos del sistema en que se encuentren instalados.

#### **1.7.4. Condiciones de operación**

Se debe tener en consideración las condiciones extremas en que operará el transformador, tales como la temperatura, ambientes corrosivos, requerimientos sísmicos y cualquier condición que pudiese afectar la operación normal del transformador.

- Frecuencia nominal: es el valor de la frecuencia en la cual el transformador de instrumento funciona adecuadamente; para la IEC la frecuencia nominal es de 50 Hz, mientras que para la IEEE/ANSI es de 60 Hz.

## 2. TRANSFORMADORES DE INTENSIDAD

### 2.1. Tipo de transformador de corriente

Se deberá seleccionar conforme al tipo de instalación en la que sea destinado a utilizar, la tensión nominal del sistema en la cual estará conectado, la corriente primaria y las relaciones especificadas y condiciones ambientales donde será instalado.

La clase del transformador conforme a su construcción se seleccionará de acuerdo con la utilización que se dará; así que podrían ser de la siguiente manera:

- Tipo primario devanado: utilizado en toda clase de instalación, con niveles de voltaje de 765 kV.
- Tipo barra: su utilización es la misma que el de tipo primario devanado.
- Tipo boquilla (dona): son transformadores que usualmente están integrados a transformadores o interruptores de potencia, los cuales alimentan a los dispositivos de protección.
- Tipo ventana: se utilizan en salidas de circuitos o líneas, como lo son barras de tableros y subestaciones con voltajes no mayor a 13.8 kV. <sup>15</sup>

---

<sup>15</sup> OSORIO RIVERA, Wilfrido. *Selección y especificación de transformadores de corriente y potencial en instalaciones eléctricas industriales*. p.8.

## 2.2. Intensidades primarias asignadas

Los transformadores de corriente deberán soportar el voltaje nominal del sistema. Es recomendable seleccionar la corriente nominal del primario en un valor entre 20 % y 40 % mayor a la corriente calculada de operación, lo cual genera un mejor rango de exactitud en los equipos de medición e instrumentación.

Al encontrar el valor de la corriente nominal se recomienda elegir el valor inmediato superior que se encuentra en el mercado.<sup>16</sup> Los valores estándares para una, dos y multirelación se muestran a continuación.

De acuerdo con la norma IEC 60044-1

- Transformadores con una sola relación

10 – 12,5 – 15 – 20 – 25 – 30 – 40 – 50 – 60 – 75 A

Y sus múltiplos y fracciones decimales, donde se prefieren los valores que están subrayados.

- Transformadores multi-relaciones: los valores mencionados anteriormente se toman como base desde el menor valor de intensidad nominal primaria asignada.<sup>17</sup>

Conforme a las normas IEEE/ANSI se tienen las siguientes tablas:

---

<sup>16</sup> Osorio Rivera, Wilfrido. *Selección y Especificación de transformadores de corriente y potencial en instalaciones eléctricas industriales*. p. 22.

<sup>17</sup> International Electrotechnical Commission IEC. *Instrument transformers –Part 1: Current transformers*, IEC 60044-1. p. 31

Tabla V. **Corrientes nominales de una o dos relaciones**

Corrientes nominales (A)			
Relación Simple		Doble relación con devanado primario serie-paralelo	Doble relación con toma central en el devanado secundario
10:5	800:5	25 × 50:5	25/50:5
15:5	1 200:5	50 × 100:5	50/100:5
25:5	1 500:5	100 × 200:5	100/200:5
40:5	2 000:5	200 × 400:5	200/400:5
50:5	3 000:5	400 × 800:5	300/600:5
75:5	4 000:5	600 × 1 200:5	400/800:5
100:5	5 000:5	1 000 × 2 000:5	600/1 200:5
200:5	6 000:5	2 000 × 4 000:5	1 000/2 000:5
300:5	8 000:5		1 500/3 000:5
400:5	12 000:5		2 000/4 000:5
600:5			

Fuente: IEEE C57.13. *IEEE Standard Requirements for Instrument Transformers*. p. 16.

Tabla VI. **Transformadores de corriente relación múltiple**

600:5		1200:5		2000:5	
50:5	X2 - X3	100:5	X2 - X3	300:5	X3 - X4
100:5	X1 - X2	200:5	X1 - X2	400:5	X1 - X2
150:5	X1 - X3	300:5	X1 - X3	500:5	X4 - X5
200:5	X4 - X5	400:5	X4 - X5	800:5	X2 - X3
250:5	X3 - X4	500:5	X3 - X4	1100:5	X2 - X4
300:5	X2 - X4	600:5	X2 - X4	1200:5	X1 - X3
400:5	X1 - X4	800:5	X1 - X4	1500:5	X1 - X4
450:5	X3 - X5	900:5	X3 - X5	1600:5	X2 - X5
500:5	X2 - X5	1000:5	X2 - X5	2000:5	X1 - X5
600:5	X1 - X5	12000:5	X1 - X5		

Continuación Tabla VI:

3000:5		4000:5		5000:5	
300:5	X3 - X4	500:5	X1 - X2	500:5	X2 - X3
500:5	X4 - X5	1000:5	X3 - X4	1000:5	X4 - X5
800:5	X3 - X5	1500:5	X2 - X3	1500:5	X1 - X2
1000:5	X1 - X2	2000:5	X1 - X3	2000:5	X3 - X4
1200:5	X2 - X3	2500:5	X2 - X4	2500:5	X2 - X4
1500:5	X2 - X4	3000:5	X1 - X4	3000:5	X3 - X5
2000:5	X2 - X5	3500:5	X2 - X5	3500:5	X2 - X5
2200:5	X1 - X3	4000:5	X1 - X5	4000:5	X1 - X4
2500:5	X1 - X4			5000:5	X1 - X5
3000:5	X1 - X5				

Fuente: IEEE C57.13. *IEEE Standard Requirements for Instrument Transformers*. p. 17.

### 2.3. Intensidades secundarias asignadas

La norma IEC 60044-1 considera 1, 2 y 5 A, con preferencia del último valor. Para los transformadores destinados a grupos de conexión en delta, los valores anteriores divididos  $\sqrt{3}$ .

### 2.4. Intensidades de calentamiento

El transformador de corriente debe resistir su intensidad de calentamiento nominal, sin llegar a exceder la temperatura admisible de los devanados, de acuerdo con su clase térmica de calentamiento.

En la tabla VII se indican los valores de intensidad nominal de calentamiento según distintas normas, expresados con un número de veces la  $I_n$ .

Tabla VII. **Intensidad nominal de calentamiento**

Gamas extendidas nominales	Corrientes nominales extendidas
IEC & UNE	IEEE/ANSI
1 1,2 - 1,5 - 2	1 - 1,33 1,5 - 2 3 - 4

Fuente: Electrónica Artech Hermanos S.A. *Introducción a los transformadores de medida*. p. 46

La norma IEEE C57.13 además establece la variación de la intensidad límite térmica (RF), en función de la temperatura ambiente.<sup>18</sup> En las normas IEC, se aceptan varios límites de calentamiento como clases de aislamiento.

Tabla VIII. **Límite de incremento de temperatura de los devanados**

Clase de aislamiento (acorde con IEC 85)	Máximo incremento de temperatura (K)
Inmerso en aceite	60
Inmerso en aceite y herméticamente sellado	65
Inmerso en compuesto bituminoso	50
Clases no inmerso en aceite o compuesto bituminoso	
Y	45
A	60
E	75
B	85
F	110
H	135

Fuente: IEC 60044-1. *Instrument Transformers – Part 1: Current Transformers*. p. 25.

<sup>18</sup> IEEE Power Engineering Society. *IEEE C57.13 Standard Requirements for Instrument Transformers*. p. 5.

Si el transformador excede la altitud de 1 000 m.s.n.m., los límites de temperatura dados en la tabla anterior deberán ser reducidos por las siguientes cantidades por cada 100 m que exceda la altitud de operación de 1 000 m.

- Transformadores inmersos en aceite 0,4 %.
- Transformadores secos 0, 5%.<sup>19</sup>

En la norma IEEE C57.13 clasifica dos tipos de transformadores inmersos en aceite desde el punto de vista de incremento de temperatura; los de 55 y 65 °C, tanto para temperaturas ambiente de 30 y 55°C, como se muestra en la siguiente tabla.

Tabla IX. **Límite de incremento de temperatura IEEE/ANSI**

Tipo de transformador de instrumento	30 °C ambiente		55 °C ambiente	
	Incremento de temperatura promedio en el devanado (°C)	Incremento de temperatura en el punto más caliente del devanado (°C)	Incremento de temperatura promedio en el devanado (°C)	Incremento de temperatura en el punto más caliente del devanado (°C)
55 °C incremento	55	65	30	40
65 °C incremento	65	80	40	55
80 °C incremento tipo seco	80	110	55	85

Fuente: IEEE C57.13. *IEEE Standard Requirements for Instrument Transformers.*

p. 8.

Para la IEEE se deberá reducir el límite de incremento de temperatura de 3 % por cada 100 m que exceda la altitud de 1 000 m<sup>20</sup>.

<sup>19</sup> International Electrotechnical Commission IEC. *Instrument transformers –Part 1: Current transformers*, IEC 60044-1. p. 33.

<sup>20</sup> IEEE Power Engineering Society. *IEEE C57.13 Standard Requirements for Instrument Transformers.* p. 5.

## 2.5. Potencias de precisión

Conforme a la IEC 60044-1, se determinan las siguientes potencias nominales hasta 30 VA:

2,5 – 5 – 10 – 15 y 30 VA. Con un factor de potencia de 0,8.

Los valores por encima de 30 VA se pueden seleccionar de acuerdo con las necesidades de aplicación.<sup>21</sup>

Según la norma IEEE C57.13 la potencia tiene asignado un determinado burden ya sea para protección o medición

Tabla X. **Burdens estándares para TI con 5A en el secundario**

Burdens	Designación de Burden	Resistencia ( $\Omega$ )	Inductancia (m $\Omega$ )	Impedancia ( $\Omega$ )	Potencia Total (VA a 5 A)	Factor de Potencia
Burdens para medición	B-0,1	0,09	0,116	0,1	2,5	0,9
	B-0,2	0,18	0,232	0,2	5,0	0,9
	B-0,5	0,45	0,580	0,5	12,5	0,9
	B-0,9	0,81	1,040	0,9	22,5	0,9
	B-1,8	1,62	2,080	1,8	45,0	0,9
Burdens para protección	B-1,0	0,50	2,300	1,0	25,0	0,5
	B-2,0	1,00	4,600	2,0	50,0	0,5
	B-4,0	2,00	9,200	4,0	100,0	0,5
	B-8,0	4,00	18,400	8,0	200,0	0,5

Fuente: IEEE C57.13. *IEEE Standard Requirements for Instrument Transformers*. p. 18.

<sup>21</sup> International Electrotechnical Commission IEC. *Instrument transformers –Part 1: Current transformers*, IEC 60044-1. p. 31.

Donde el número que está al lado de la letra B indica la impedancia a 60Hz y teniendo una tolerancia de +5 % y 0 %. En la tabla también se muestra el factor de utilizado para protección de 0,5, mientras que los de medición son 0,9.<sup>22</sup>

La siguiente tabla muestra las comparaciones entre las cargas IEC y la IEEE.

Tabla XI. **Equivalencias aproximadas entre cargas IEC e IEEE**

IEEE/ANSI	IEC
B-0,1	2,5 VA
B-0,2	5 VA
B-0,5 ( ≈ 12,5 VA)	15 VA
B-0,9 ( ≈ 22,5 VA)	20 VA
B-1 ( ≈ 25 VA)	30 VA
B-1,8 ( ≈ 45 VA)	40 VA
B-2	50 VA
B-4	100 VA
B-8	200 VA

Fuente: Electrónica Artech Hermanos S.A. *Introducción a los transformadores de medida.*

p. 46.

## 2.6. Intensidades de cortocircuito

La corriente que aparece durante un cortocircuito en la línea origina esfuerzos electromecánicos, teniendo problemas térmicos y dinámicos en el transformador.

Si  $I_{cc}$  es la corriente de cortocircuito de la red y t la duración máxima en segundos (entre 0,5 y 5 seg), la intensidad límite térmico del transformador (expresada para 1 segundo) deberá cumplir lo siguiente:

<sup>22</sup> IEEE Power Engineering Society. *IEEE C57.13 Standard Requirements for Instrument Transformers.* p. 18.

$$I_{term} \geq I_{cc} \sqrt{t}$$

donde  $I_{term}$  e  $I_{cc}$  están en valores eficaces.

El efecto dinámico se produce a la máxima amplitud de la onda de intensidad de cortocircuito, por esta razón algunas normas relacionan los valores de las intensidades térmica y dinámica.

En el caso extremo las normas IEC y UNE establecen:  $I_{din} \geq 2,5 I_{term}$

En IEEE/ANSI la corriente dinámica se determina como el valor pico de la componente simétrica de una onda totalmente desplazada.

$$I_{din} = 2x\sqrt{2} x I_{term} = 2,83 I_{term} \quad ^{23}$$

## 2.7. Marcado de bornes y polaridad

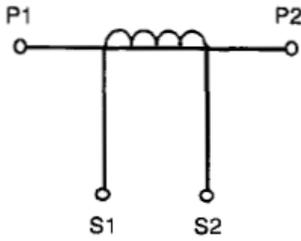
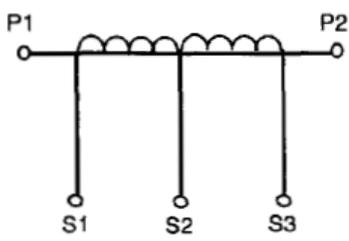
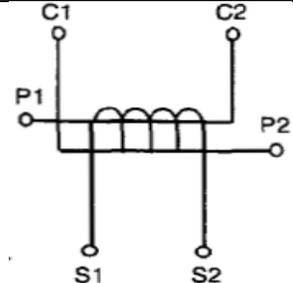
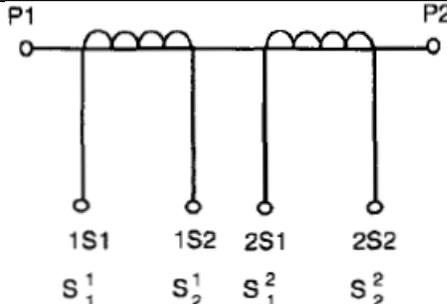
Los bornes deberán estar indicados claramente e indeleblemente sobre su superficie o en su proximidad inmediata, donde tendrán las marcas en las terminales del devanado primario y secundario, tomas de prueba intermedio, como la polaridad.

La designación de los bornes varía de acuerdo con la norma, como por ejemplo la IEC 60044-1 utiliza letras en mayúscula, precedidas o seguidas de números, donde las letras P1, S1, y C1 deberán tener la misma polaridad en el mismo instante:

---

<sup>23</sup> Electrónica Artech Hermanos S.A. *Introducción a los transformadores de medida*. p. 47.

Tabla XII. **Marcado de terminales IEC 60044-1**

<p>Terminales primarias</p> <p>Terminales secundarias</p>	 <p>Transformador de relación simple</p>	 <p>Transformador con tap intermedio en el secundario</p>
<p>Terminales primarias</p> <p>Terminales secundarias</p>	 <p>Transformador con el primario en dos secciones destinado para conexiones en serie o paralelo</p>	 <p>Transformador con dos devanados secundarios</p>

Fuente: IEC 60044-1. *Instrument Transformers – Part 1: Current Transformers*. p. 51.

Según la norma IEEE/ANSI se utiliza la letra H para las terminales del primario y la letra X para los del secundario, si tuviese varios secundarios se utilizan las letras Y, Z, V, etc. La polaridad se establece por un número después de cada letra: por ejemplo, H1, H2, X1, X2, etcétera, donde los números impares tienen la misma polaridad.

Si un transformador tuviese varios devanados primarios se designará las terminales con números pares consecutivos H1, H2, H3, H4, et., siendo los primeros dos para el primer devanado. Cuando existen tomas en lado del secundario se indicará con las mismas letras que arriba se mencionan y numeradas de la siguiente manera X1, X2, X3, o Y1, Y2, Y3, teniendo en cuenta

que la numeración más alta junto con la más baja indicara el uso del devanado completo.<sup>24</sup>

## 2.8. Placa de datos

La norma IEC, establece que todos los transformadores de intensidad deben indicar, por lo menos los siguientes datos:

- Nombre del fabricante
- Tipo de aparato
- Número de serie
- Relación de transformación de la forma
  - $K_n = I_{pn}/I_{sn}$  (ejemplo  $K_n = 100/5$  )
- Frecuencia nominal (ejemplo 50 Hz).
- Las potencias de precisión, clases de precisión y la designación de los bornes correspondiente a cada arrollamiento.
- La tensión más elevada para el material y su nivel de aislamiento.
- Las intensidades de cortocircuito térmica y dinámica nominales en kA.

En los transformadores de baja tensión, no son obligatorios los dos últimos datos.

Los transformadores de corriente para medición deberán indicar, además si procede, el factor límite de seguridad (en la forma  $F_s \leq x$ ) que corresponda a

---

<sup>24</sup> IEEE Power Engineering Society. *IEEE C57.13 Standard Requirements for Instrument Transformers*. p. 10.

la carga de precisión indicada.

Para transformadores de gama extendida (alta precisión), se indicará el grado de extensión de la clase de precisión. (ejemplo: 15 VA clase 0,5 150 %).

A los transformadores de intensidad para protección también se indicará el factor límite de precisión (ejemplo: 30 VA clase 5P10).<sup>25</sup>

Conforme a la IEEE la placa de datos deberá incluir como mínimo los siguientes datos:

- Nombre del fabricante
- Tipo de aparato
- Número de serie (SER)
- Corriente nominal primaria y secundaria
- Voltaje nominal del sistema o voltaje máximo del sistema
- Nivel básico al impulso (BIL kV)
- Frecuencia nominal (Hz)
- Factor nominal de la corriente térmica continua
- Clase de exactitud
  - Clase de exactitud para medición con burden; como mínimo el burden en el cual el transformador es clasificado 0,3 clase de exactitud.
  - Exactitud nominal para protección para transformadores destinados para aplicación de protección.<sup>26</sup>

---

<sup>25</sup> International Electrotechnical Commission IEC. *Instrument transformers –Part 1: Current transformers*, IEC 60044-1. p. 89.

<sup>26</sup> IEEE Power Engineering Society. *IEEE C57.13 Standard Requirements for Instrument Transformers*. p. 21.

## 2.9. Transformadores de intensidad para medida

Los transformadores de corriente son utilizados para alimentar dispositivos de medición.

Para resguardar los aparatos alimentados por el transformador, al momento de un corto-circuito en la red en el cual está conectado el primario debe de tenerse en cuenta el factor nominal de seguridad, que se define como:

$$F_s = I_{ps}/I_{pn}$$

Donde:

$$I_{np} = \textit{intensidad nominal de corriente}$$

$$I_{ns} = \textit{intensidad nominal de corriente}$$

La intensidad nominal de seguridad, es la intensidad primaria, para la que, el transformador empieza a saturarse. En ese momento la corriente secundaria multiplicada por la relación de transformación nominal debe ser menor o igual a 0,9 veces la corriente primaria:

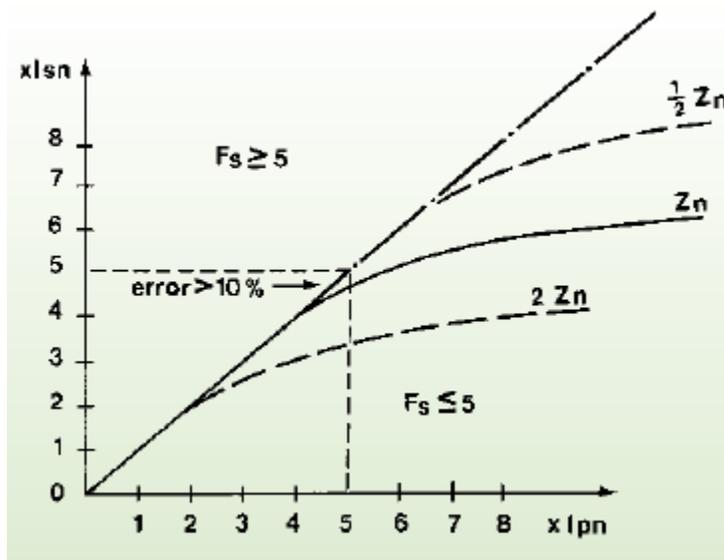
$$K_s I_{ss} < 0,9 I_{ps}$$

Se puede observar en la figura 18, la relación entre las intensidades primaria y secundaria, para  $F_s \leq 5$ .

Un transformador de corriente para que tenga precisión alta con un factor nominal de seguridad bajo, se debe utilizar en la construcción del núcleo, chapa magnética de gran permeabilidad y saturación rápida, que usualmente se logra con una chapa de alto porcentaje de níquel (ejemplo: Mumetal), con un alto valor de costo.

Por lo tanto, antes de escoger  $F_s$ , se debe comprobar si es necesaria su utilización, y si es de vital importancia acordar con el fabricante el precio del transformador.<sup>27</sup>

Figura 18. Relación de intensidades primaria y secundaria



Fuente: Electrónica Artech Hermanos S.A. *Introducción a los transformadores de medida*. p. 12.

### 2.9.1. Clase de precisión

La clase de precisión de un TC para medición, se caracteriza por un número (índice de clase) el cual indica el límite de error de relación, que se expresa en porcentaje para la corriente nominal del 'primario cuando el transformador alimenta la "carga de precisión".

La norma IEEE/ANSI las clasifica de la siguiente manera: 0,1, 0,2, 0,3, mientras que la IEC las clasifica de la siguiente manera 0,1, 0,2, 0,5, 1 y 3.

<sup>27</sup> Electrónica Artech Hermanos S.A. *Introducción a los transformadores de medida*. p. 12.

La siguiente tabla muestra algunos usos que se le pueden dar a los transformadores de corriente de medición de acuerdo al uso que se les quiera dar.

Tabla XIII. **Guía de aplicación de TC**

Clase 0,1	Laboratorio
Clase 0,2	Laboratorio, patrones portátiles, medidores de gran precisión
Clase 0,5	Medidores normales y aparatos de medida
Clase 1	Aparatos de cuadro
Clase 3	Para usos en los que no se requiere alta precisión

Fuente. Electrónica Artech Hermanos S.A. *Introducción a los transformadores de medida.*

p. 26.

### 2.9.2. Índice de corriente extendida IEC

La norma IEC 60044.1 especifica qué son los CT's de medición, en donde las características de precisión y calentamiento se extienden a valores de corriente primario, superiores al 120 % de lo nominal.

Normalmente se considera como límite de índice de corriente extendida 150 % y el 200 % de la corriente nominal.

Las aplicaciones donde se requiera una alta precisión, en los CT's clase 0,2 y 0,5 con  $I_{sn} = 5 A$ , puede extenderse la precisión hasta el 1 % de la  $I_{pn}$  pasando las clases a denominarse 0,2S y 0,5S.<sup>28</sup>

Verificación

<sup>28</sup> International Electrotechnical Commission IEC. *Instrument transformers –Part 1: Current transformers*, IEC 60044-1. p. 69.

La verificación de la clase en CT's de medición consiste en medir la relación de transformación con una precisión del orden de 0,01 %. La realización de esta prueba en forma absoluta, únicamente es posible en laboratorios.

La verificación del factor de seguridad se puede realizar de la siguiente manera:

- Alimentar el devanado primario con la corriente nominal de seguridad, teniendo en cuenta que el error en el secundario, con su carga de precisión, es mayor o igual al 10 %
- Excitar el transformador a través del arrollamiento secundario hasta obtener en bornes del secundario:  $U_o = F_s I_{ns} Z_t$  y comprobando que  $I_o \geq 0,1 F_s I_{ns}$

El factor de seguridad depende de la carga secundaria, sí se aumenta su valor en la misma proporción en que la carga total disminuye<sup>29</sup>.

### **2.9.3. Límite de error de relación en los transformadores de intensidad para medida**

La tabla XIV muestra la clase de precisión acorde a la norma IEEE C57.13, donde el factor de potencia de la carga medida puede estar entre 0,6 y 1 en retraso.

---

<sup>29</sup> Electrónica Artech Hermanos S.A. *Introducción a los transformadores de medida*. p. 13.

**Tabla XIV. Límite de error de relación y fase para TI de medición**

Clase de precisión	Error de relación en %, para los valores de la intensidad expresados en % de la intensidad nominal $\pm \epsilon_i$ %		Error de relación en %, para los valores de la intensidad expresados en % de la intensidad nominal $\pm \delta_i$ % (minutos)	
	100	10 I <sub>n</sub>	100	10
0,3	0,3	0,6	15	30
0,6	0,6	1,2	30	60
1,2	1,2	2,4	60	120

Fuente: IEEE.C57.13. IEEE *Standard Requirements for Instrument Transformers*. p. 13.

Existe una interdependencia entre los errores permitidos en relación y fase. Con los datos de la tabla anterior se traza una gráfica en la cual solo se aceptan los valores dentro del paralelogramo. La norma IEEE C57.13.6 establece también transformadores de corriente de alta exactitud, llegando a denominarse clases 0,15 y 0,15S.

La norma IEC 60044-1 establece las siguientes clases de exactitud 0,1 -0,2 -0,5 -1 -3 -5 y los valores de error de corriente y desplazamiento de fase a frecuencia nominal (50 hz) no deberán superar los valores dados en la siguiente tabla cuando en el secundario la carga esta entre 25 % y 100 % de la carga nominal.

Tabla XV. **Límites de error de corriente y desplazamiento de fase (clases de 0,1 a 1)**

Clase de precisión	Error de relación en %, para los valores de la intensidad expresados en % de la intensidad nominal $\pm \epsilon_i$ %				Error de fase para los valores de la intensidad expresados en % de la intensidad nominal $\pm \delta_i$ %							
					Minutos				Centirradiares			
	5	20	100	120	5	20	100	120	5	20	100	120
0,1	0,4	0,2	0,1	0,1	15	8	5	5	0,45	0,24	0,15	0,15
0,2	0,75	0,35	0,2	0,2	30	15	10	10	0,9	0,45	0,3	0,3
0,5	1,5	0,75	0,5	0,5	90	45	30	30	2,7	1,35	0,9	0,9
1,0	3,0	1,5	1,0	1,0	180	90	60	60	5,4	2,7	1,8	1,8

Fuente: IEC 60044-1. *Instrument Transformers – Part 1: Current Transformers*. p. 55.

Para las clases 0,2 S y 0,5 S el error de corriente y desplazamiento de fase no deberá exceder los valores dados en la siguiente tabla con carga en el secundario entre el 25 % y 100 % de la carga nominal. Estas clases deberán ser principalmente usados para relaciones 25/5, 50/5 y 100/5 y sus múltiplos decimales y solo para corriente nominal de 5A.

Tabla XVI. **Límites de error de corriente y error de fase (gama extendida)**

Clase de precisión	Error de relación en %, para los valores de la intensidad expresados en % de la intensidad nominal $\pm \epsilon_i$ %					Error de fase para los valores de la intensidad expresados en % de la intensidad nominal $\pm \delta_i$ %									
						Minutos					Centirradiares				
	1	5	20	100	120	1	5	20	100	120	1	5	20	100	120
0,2 S	0,75	0,35	0,2	0,2	0,2	30	15	10	10	10	0,9	0,45	0,3	0,3	0,3
0,5 S	1,5	0,75	0,5	0,5	0,5	90	45	30	30	30	2,7	1,35	0,9	0,9	0,9

Aplicable únicamente para aparatos con intensidad secundaria nominal de 5A

Fuente: IEC 60044-1. *Instrument Transformers – Part 1: Current Transformers*. p. 55.

Para las clases 3 y 5 el error de relación a frecuencia nominal no deberá exceder los valores de la siguiente tabla con carga en el secundario de 50 % y 100 % de la carga nominal.

Tabla XVII. **Límites de error de relación clase 3 y 5**

Clase de precisión	Error de relación en %, para los valores de la intensidad expresados en % de la intensidad nominal $\pm \epsilon_i$ %	
	50	120
3	3	5
5	3	5

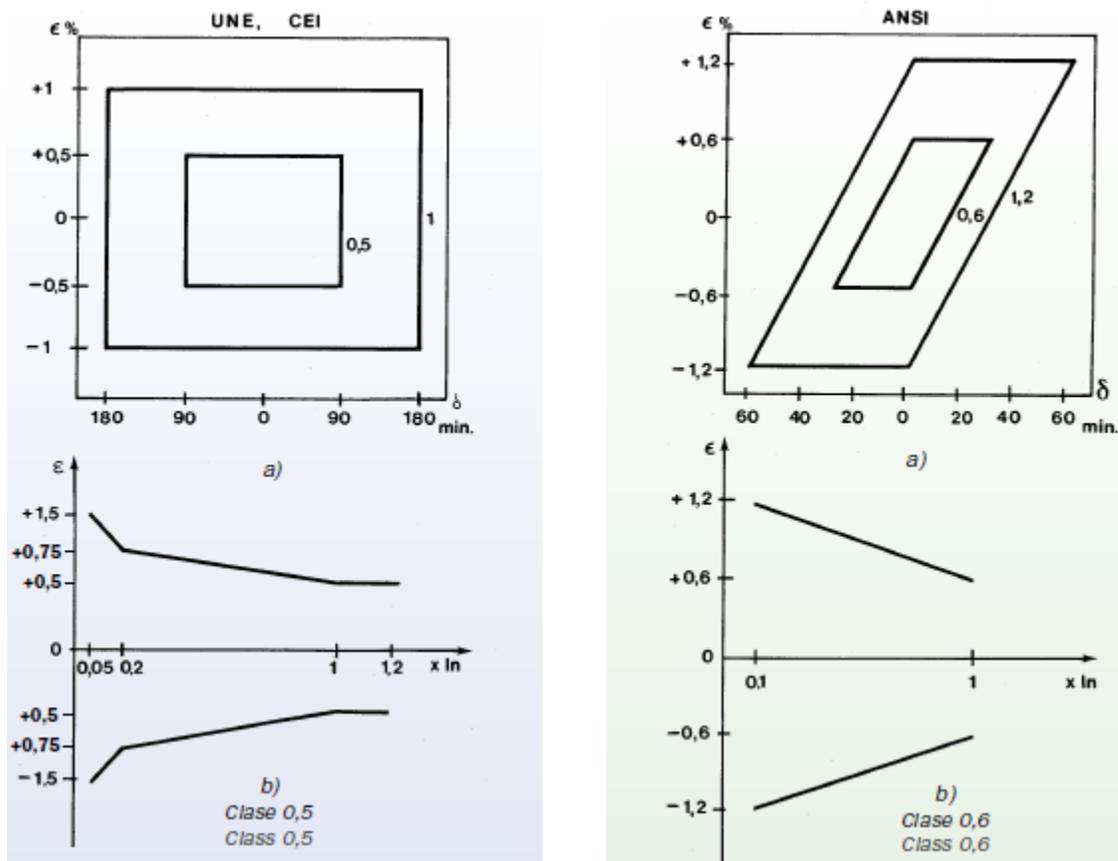
Fuente: IEC 60044-1. *Instrument Transformers – Part 1: Current Transformers*. p. 57.

Nota: la carga secundaria usada para propósitos de prueba deberá tener un factor de potencia de 0,8 en retraso, excepto cuando el burden es menor a 5 VA, el factor de potencia deberá ser 1,0.

En ningún caso la carga de prueba deberá ser menor a 1VA.<sup>30</sup> A continuación, se muestra una figura comparativa de las dos normas.

<sup>30</sup> International Electrotechnical Commission IEC. *Instrument transformers –Part 1: Current transformers*, IEC 60044-1. p. 71.

Figura 19. Comparación de transformadores de corriente de medición



Fuente: Electrónica Artech Hermanos S.A. *Introducción a los transformadores de medida.*

p. 53.

## 2.10. Transformadores de intensidad para protección

Son transformadores de corriente que se destinan a alimentar relés de protección, por lo que se debe asegurar una precisión suficiente para intensidades de valor igual a varias veces la intensidad nominal.

### 2.10.1. Clase de precisión

IEEE/ANSI C57.13 define un método para clasificar la exactitud de los transformadores de corriente que se utilizan para protección con la siguiente nomenclatura:

- Clase C: cubre los transformadores en el cual el flujo de fuga en el núcleo del transformador no tiene un efecto apreciable en la relación ni con el burden. Son transformadores tipo dona que tienen el devanado distribuido en el núcleo por lo que la corriente primaria se puede calcular si se conoce la corriente secundaria y la relación de transformación.
- Clase T: son transformadores que tienen devanado primario donde el flujo de dispersión tiene un efecto apreciable en la relación. Si se conoce la corriente circulando por el secundario es necesario hacer una prueba para conocer cuál es la corriente primaria circulando. Los fabricantes deberán de proveer las curvas de corriente.
- Clase X: es definido por el cliente para una condición específica en el cual los requerimientos mínimos para la excitación secundario son los siguientes:
  - $V_k$ : es el voltaje mínimo del punto de saturación (punto de inflexión).
  - $I_k$ : es la corriente máxima de excitación a  $V_k$ .
  - $R_{ct}$ : es la máxima resistencia secundaria permisible corregida a 75 °C con una medición a corriente directa.<sup>31</sup>

---

<sup>31</sup> IEEE Power Engineering Society. *IEEE C57.13 Standard Requirements for Instrument Transformers*. p. 18.

Bajo la normativa IEC 60044.1 la clase de precisión de un transformador de corriente para protección, se caracteriza por un número (índice de clase) y la letra "P" (inicial de protección).

El índice de clase muestra el límite superior del error compuesto para la intensidad límite de precisión nominal y la carga de precisión.

Las clases de precisión normales son: 5P y 10P.

Para los sistemas de protección donde las características del transformador son esenciales del sistema (aparatos de protección diferencial de reacción rápida) se utilizan las clases de protección PR Y PX.

- Clase PR: transformadores que aseguran la protección como un factor de remanencia (relación entre flujo remanente y el flujo de saturación) limitado donde se especifica un valor de la constante de tiempo del bucle secundario y/o un valor máximo de la resistencia del devanado secundario.
- Clase PX: son transformadores de baja reactancia de fuga (sin entrehierro) donde el conocimiento de la curva de excitación del secundario, la resistencia del devanado secundario, la resistencia de la carga secundaria y la relación de transformación es suficiente para evaluar su comportamiento con el sistema de protección al que será utilizado.

Verificación

Para transformadores de corriente de protección la verificación de precisión de corriente nominal, se realiza con el mismo método que para los transformadores de corriente de medida.

La verificación de error compuesto, para la intensidad límite de precisión, se puede hacer de la siguiente manera.

- Alimentar el devanado primario con una corriente sinusoidal, igual en valor eficaz a la intensidad límite de precisión.
- Determinar la corriente de excitación para la frecuencia nominal y una tensión sinusoidal de valor eficaz igual al de la fuerza electromotriz límite del secundario.

Para el primer método su aplicación es difícil excepto para transformadores de pequeña corriente primaria y bajo factor límite de precisión nominal. Se puede utilizar en los ensayos de tipo. Para ensayos individuales, el método utilizado es el de excitación.<sup>32</sup>

### **2.10.2. Límites de error de relación en los transformadores de intensidad para protección**

La norma IEC 60044-1 establece las clases y errores que se indican en la siguiente tabla. Los secundarios deben ser cargados con su potencia nominal de precisión.

---

<sup>32</sup> Electrónica Artech Hermanos S.A. *Introducción a los transformadores de medida*. p. 16.

Tabla XVIII. **Error de relación de transformadores de intensidad de protección**

Clase de precisión	Error de relación para la intensidad nominal (*) $\pm \epsilon_i$ %	Error de fase para la intensidad nominal $\delta_i$		Error compuesto para la intensidad límite de precisión %
		Minutos	Centirradiantes	
5P y 5R*	$\pm 1$	$\pm 60$	$\pm 1,8$	5
10P y 10PR*	$\pm 3$	-	-	10

\*El factor de remanencia  $K_r$  no deberá de exceder el 10%

Fuente: IEC 60044-1. *Instrument Transformers – Part 1: Current Transformers*. p. 15 y 61.

La clase de precisión está dada por el máximo porcentaje de error compuesto permitido para el valor nominal de la corriente primaria. Los porcentajes de error no deben exceder los valores indicados en la tabla anterior, en los siguientes casos:

- Para propósitos de prueba para determinar el error y el desplazamiento de fase, el burden deberá tener un factor de potencia de 0,8 inductivo (atraso), excepto cuando el burden es menor a 5 VA con un factor de potencia de 1,0 permisible.
- Para carga o burden especificados.
- Para el 100 % de la corriente nominal en el primario.

Un transformador de intensidad con el factor de remanencia limitado permite especificar un valor límite de la resistencia del devanado, tiene una clase de precisión dada por el máximo porcentaje de error compuesto permitido para el valor nominal de la corriente primaria y se designa por la clase de precisión seguido por las letras “PR”, que significa protección de baja remanencia; los valores estándares para la precisión de estos transformadores de intensidad son 5PR y 10PR.<sup>33</sup>

<sup>33</sup> OSORIO RIVERA, Wilfrido. *Selección y especificación de transformadores de corriente y potencial en instalaciones eléctricas industriales*. p. 8.

La normativa IEEE/ANSI establece las clases C, K, y T para TI de protección. Los transformadores clase C y K, poseen un devanado uniformemente repartido por lo que las pérdidas de flujo son despreciables. Los errores de estos transformadores pueden verificarse mediante cálculo. Los de clase K incluyen además una restricción en su curva de saturación.

Tabla XIX. **Límites de error de relación transformadores TI protección**

Limits of ratio error relay class	In	20 veces In
Clasificación C y T	3%	10%
Clasificación X	1%	definido por usuario

Fuente: IEEE C.5713. *IEEE Standard Requirements for Instrument Transformers*. p 18.

Los transformadores (clase C, K y T), deberán tener un error de relación menor a 10 % a 20 In. La designación se realiza indicando la letra C, K o T, seguido del voltaje en el secundario en régimen de sobreintensidad. Por ejemplo: la clase C100 expresa que a 20 Isn= 20x5A= 100 A, la tensión en los bornes secundarios es 100V (por tanto, la carga es de 1 Ohmio).

Para un transformador C800 soportar una tensión de 800V en terminales del secundario sin exceder el 10 % de error para 20 veces la corriente nominal: 20x5A=100A, el burden se establece como:

$$Burden = \frac{V}{Is \times 20}$$

Donde

V = voltaje en terminales del secundario

Is= corriente en el secundario

Por tanto:

$$Burden = \frac{800V}{5A \times 20} = 8\Omega$$

Conforme a lo anterior los valores de voltaje y burden estándar para un TC con precisión C o T se muestran en la siguiente tabla:

Tabla XX. **Voltaje secundario y burden estándar TC clase C y T**

Tensión en el secundario	Burden Estándar
10	B-0,1
20	B-0,2
50	B-0,5
100	B-1,0
200	B-2,0
400	B-4,0
800	B-8,0

Fuente: IEEE C57.13. *IEEE Standard Requirements for Instrument Transformers*. p. 19.

Si la corriente nominal secundaria del transformador no es igual a 5 A, el burden apropiado se calculará dividiendo el voltaje nominal secundario entre  $I_s \times 20$ . Por ejemplo, si la corriente nominal del secundario de 1 A con clase C100 el burden correspondiente será  $100 \text{ V} / (1\text{A} \times 20) = 5\Omega$ .<sup>34</sup>

## 2.11. Transformadores de intensidad para protección donde es esencial la respuesta en régimen transitorio IEC

La norma IEC especifica que cuando se requiera utilizar un transformador de corriente para protección que responda correctamente durante los primeros

---

<sup>34</sup> IEEE Power Engineering Society. *IEEE C57.13 Standard Requirements for Instrument Transformers*. p. 19.

ciclos de un cortocircuito, es necesario sobredimensionar el núcleo para que no se sature con la componente aperiódica.

El valor inicial de la componente aperiódica, depende del valor de la tensión en el momento de producirse el cortocircuito y de las características de la línea, oscila entre 0 y  $\sqrt{2} I_{cc}$ , donde  $I_{cc}$  es el valor eficaz de la intensidad de cortocircuito simétrica.

Si se considera que este valor es máximo, la intensidad de cortocircuito transitorio es

$$i_{cc} = \sqrt{2} I_{cc} (e^{-t/T_1} - \cos \omega t)$$

Donde  $T_1 = L/R$  es la constante de tiempo de la línea.

La norma IEC 60044-6 clasifica transformadores de intensidad para protección que respondan correctamente durante los primeros ciclos de un cortocircuito.

#### Clasificación de los TI

Se encuentran tres clases:

- TPX: TI con núcleo sin entrehierros, con una amplia sección para responder confiablemente durante el período transitorio. Refleja bien las componentes aperiódicas. El valor de  $T_2$  (constante de tiempo del transformador) es grande comparado con el  $T_1$  (constante de tiempo de la línea).

- TPY: TI posee pequeños entrehierros en el núcleo, reduciendo la inductancia remanente. Refleja bastante bien la componente aperiódica. El valor de  $T_2$  depende de las exigencias de precisión (0,3 y 1 segundos).
- TPZ: TI con entrehierros superiores a los del TPY, el cual refleja bien la componente alternante pero no la aperiódica. El valor de  $T_2$ , es del orden de 0,007 segundos. Debido a los entrehierros, no es posible obtener mucha precisión a  $I_n$ .<sup>35</sup>.

### 2.11.1. Carga

Es la impedancia del circuito el cual alimenta el devanado secundario, y se expresa en ohmios, donde se indica su factor de potencia. Esta también puede ser expresada por su factor de potencia y la potencia aparente en voltio-amperios, que absorbe la corriente secundaria nominal.

Ejemplo: potencia de precisión 30VA para  $I_{sn} = 5A$

$$Z = \frac{S}{I_{sn}^2} = \frac{30VA}{(5A)^2} = 1.2 \text{ Ohmios}$$

Para calcular la carga secundaria, se debe tener en cuenta la carga de los aparatos de medida, la carga de los cables de interconexión.

Para los TI clase tipo "TP", se debe solicitar lo más cercana a la potencia necesaria y evitar que el consumo de los cables sea importante para compensar

---

<sup>35</sup> Electrónica Artech Hermanos S.A. *Introducción a los transformadores de medida*. p. 18.

parcialmente el sobredimensionamiento del núcleo en comparación con los de protecciones normales.<sup>36</sup>

## 2.12. Resistencia a cortocircuito

Los transformadores de corriente están conectados en serie con las líneas de alimentación, por lo tanto, están sometidos a sobretensiones y sobreintensidades.

Las sobrecorrientes son muy superiores a la corriente nominal de los TI y originan efectos térmicos y dinámicos que pueden causarle daños irreversibles al transformador.

Para efectos térmicos es muy importante dimensionar adecuadamente el primario del TI, ya que todo calor producido queda almacenado en el conductor primario.

Los esfuerzos dinámicos pueden romper el transformador, por lo que es necesario adecuar una sujeción mecánica al primario. Los esfuerzos mecánicos son función del valor máximo de la cresta de la intensidad de cortocircuito.

Si se conoce la potencia máxima de cortocircuito de la línea donde se encuentra el TI, se puede calcular la intensidad térmica de la siguiente manera:

$$I_{t\acute{e}rm} = \frac{P}{\sqrt{3} * V}$$

Donde:

---

<sup>36</sup> Electrónica Artech Hermanos S.A. *Introducción a los transformadores de medida*. p. 19.

$I_{t\acute{e}rm}$  = Corriente térmica de cortocircuito (kA ef.)

P= Potencia de cortocircuito (MVA)

V= Tensión (kV)

La corriente dinámica de cortocircuito se obtiene a partir de la térmica, considerando que está en valor eficaz y la dinámica en valor de la cresta máxima. El coeficiente debido a la componente aperiódica, se considera generalmente 1,8 (normas IEC, UNE, etcétera). Por lo tanto:

$$I_{din} = 1,8 \sqrt{2} I_{t\acute{e}rm} = 2,5 I_{t\acute{e}rm}$$

Donde:

$I_{din}$  = Intensidad dinámica de cortocircuito (kA cr.)

La resistencia a cortocircuitos de los transformadores de corriente se calcula por las intensidades límite térmica y dinámica.

### **2.13. Intensidad límite térmica ( $I_{term}$ )**

Es el valor eficaz más alto de la corriente primaria, que el transformador puede soportar al efecto Joule durante un segundo, sin que sufra un daño, con el circuito secundario en cortocircuito. Se establece en kA eficaces.

Si la duración de cortocircuito difiere a 1 segundo (entre 0,5 y 5) se determinará la duración de la  $I_{term}$  de la siguiente manera:

$$I_{term1} \times \sqrt{t_1} = I_{term2} \times \sqrt{t_2}$$

Los transformadores con clase térmica A, admiten una densidad de corriente de  $180 \text{ A/mm}^2$  en conductores de cobre, con una temperatura de incremento máximo de  $235 \text{ }^\circ\text{C}$  (La norma IEEE/ANSI tiene un valor más severo en este aspecto).

Generalmente los TI se construyen con un  $I_{term} = 80 I_n$ , pero puede fabricarse incluso con  $I_{term} = 1000 I_n$ , aunque hay que tener en cuenta que en este caso se reduce la potencia y la clase de precisión que puede suministrar un TI al disminuir los amperivoltios nominales

#### **2.14. Intensidad límite dinámica ( $I_{din}$ )**

Es el valor de cresta de la primera amplitud de corriente que puede resistir un transformador sin sufrir algún daño, cuando el circuito secundario está en cortocircuito. Se expresa en kA amplitud.

En varias normas  $I_{din} = 2,5 I_{term}$ , aunque en la norma IEEE/ANSI, éstas intensidades se definen separadamente y la intensidad límite dinámica se expresa en kA ef., con la corriente totalmente desplazada. Es decir:

$$I_{cresta} = 2x\sqrt{2} x I_{din} = 2,83 I_{din}$$

Donde:

$I_{din}$  = Intensidad dinámica nominal. (kA ef.)<sup>37</sup>

---

<sup>37</sup> Electrónica Artech Hermanos S.A. *Introducción a los transformadores de medida*. p. 21.

## 2.15. Funcionamiento del TI a circuito abierto

Si se considera un transformador de corriente cuya relación es de 1000/1, teniendo núcleo toroidal de longitud media de 35 cm, y donde la chapa magnética se satura con 1AV/cm. Al momento de funcionar con su circuito secundario abierto a partir de  $I_p = 35A = 0,035 I_{pn}$  el núcleo se saturará.

Al momento de  $0,1 I_{pn}$  la pendiente del flujo se eleva rápidamente y, asimismo el voltaje en terminales del secundario, donde el valor de cresta es proporcional a  $\sqrt{I_p}$ . Las pérdidas en el núcleo aumentan, originando un incremento de temperatura intolerable.

Este problema se hace notar en transformadores de protección por las dimensiones de núcleo, por lo que a veces se limita la tensión de cresta en los terminales del secundario a 4 u 8 kV, y se determina el tiempo máximo de funcionamiento del transformador en estos parámetros, de común acuerdo cliente-fabricante, ya que desde un principio los transformadores de corriente no se garantizan para funcionar con el secundario abierto si la tensión es superior a 3,5 kV cresta.<sup>38</sup>

## 2.16. Elección del transformador de corriente

Es importante tomar en cuenta las siguientes consideraciones, recordando los siguientes puntos:

- Normativa o estándar (IEC o IEEE).

---

<sup>38</sup> Electrónica Artech Hermanos S.A. *Introducción a los transformadores de medida*. p. 21.

- Tipo de instalación, interior o intemperie. Teniendo la altura para valores superiores a 1 000 m., por encima del nivel del mar.
- Tensión nominal y nivel de aislamiento. Se deben seleccionar los valores de acuerdo a su utilización, considerando las diversas normas.
- Temperatura ambiente.
- Relación de transformación nominal, teniendo en cuenta que se puede recurrir a la doble o triple relación y a la gama extendida, de acuerdo con la utilización que se quiera dar.
- Clase de precisión: protección o medición, de acuerdo a las diversas normas.
- Potencia nominal, de acuerdo con las diversas normas. Pero no deberá excederse la potencia nominal, si la potencia del aparato a instalar y la nominal tienen mucha diferencia, se puede colocar una resistencia en serie.
- Factor nominal de seguridad (en caso necesario).
- Factor límite de precisión nominal (transformadores para protección).
- Intensidades límites térmica y dinámica. No conviene excederse, ya que podría incrementar considerablemente el precio del transformador.
- Frecuencia nominal.
- Núcleo de secundarios (núcleos).
- Detalles constructivos.
  - Si existen secundarios de protección de tipo “TP” hay que tener en cuenta también.
- Constante de tiempo de la línea ( $T_1$ ) para IEC.
- Características de corto circuitos ( $t^l$ , FRT,  $T_D$ ).
- Precisión necesaria In.

- Precisión necesaria durante el período transitorio, podrá especificarse únicamente a la componente simétrica (TPZ) o también a la componente asimétrica (TPX y TPY).<sup>39</sup>

---

<sup>39</sup> Electrónica Artech Hermanos S.A. *Introducción a los transformadores de medida*. p. 23.

### 3. TRANSFORMADORES DE TENSIÓN

Se deberán tener en cuenta los siguientes requerimientos para transformadores de tensión.

#### 3.1. Selección del tipo

El tipo de aislamiento del transformador de potencial deberá seleccionarse de acuerdo con la tensión nominal del sistema en el cual opera:

- Tipo seco en sistemas de hasta 34.5 kV
- En aceite cuando operan en sistemas de 34.5 kV y superior

Conforme a los aspectos de construcción se tienen las siguientes clases:

- Transformador de potencial inductivo: transformador convencional que tiene dos bobinas.
- Transformador de potencial capacitivo. Utiliza un divisor de tensión capacitivo conectado entre fase y tierra de un circuito de potencia. Generalmente se utilizan en líneas, son más baratos que los inductivos, pero son inestables con la temperatura, también es utilizado como Onda portadora por Alta Tensión (OPLAT), como medio de acoplamiento principal.<sup>40</sup>

---

<sup>40</sup> OSORIO RIVERA, Wilfrido. *Selección y especificación de transformadores de corriente y potencial en instalaciones eléctricas industriales*. p. 33.

### 3.2. Voltajes primarios asignados

Se elegirá acorde con la tensión nominal del sistema en que operará y conforme a la conexión del devanado primario.

Las normas IEC-UNE establecen las tensiones de la siguiente tabla, aunque también admite más posibilidades:

Tabla XXI. **Tensiones primarias asignadas**

Tensiones nominales de aislamiento kV	Tensiones primarias asignadas V
0,6	110 - 220 -385-440
3,6	2,200 - 3,300
7,2	5,500 - 6,600
12	11,000
17,5	13,200 -16,500
24	22,000
36	27,500 -33,000
52	44,000
72,5	55,000 -66,000
123	110,000
145	132,000
245	220,000
420	596,000

Fuente: Electrónica Artech Hermanos S.A. *Introducción a los transformadores de medida.*

p. 56

Los transformadores de potencial monofásicos, que no puedan conectarse más que entre fase y tierra, se establecerá como voltajes primarios asignados los valores indicados divididos por  $\sqrt{3}$ .

La norma IEEE C57.13 los clasifica en cinco grupos de transformadores de tensión:

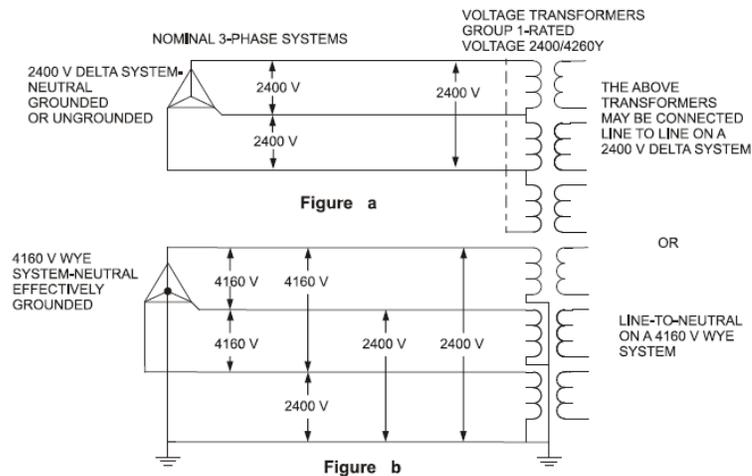
Grupo 1: transformadores que pueden instalarse entre fases en una red de tensión  $U_p$ , o entre fase y tierra en una red de tensión  $\sqrt{3}U_p$ .

Tabla XXII. **Grupo 1, Voltajes primarios nominales y relación**

Voltaje Nominal (V)	Relación	Nivel Básico al Impulso (kV crest)
120/ 208Y	01:01	10
240/416Y	02:01	10
300/520Y	2.5:1	10
120/208Y	01:01	30
240/416Y	02:01	30
300/520Y	2.5:1	30
480/832Y	04:01	30
600/1040Y	05:01	30
2400/4160Y	20:01	60
4200/7270Y	35:01:00	75
4800/8320Y	40:01:00	75
7200/12 470Y	60:01:00	110 ó 95
8400/ 14 400Y	70:01:00	110 ó 95
12 000/ 20 750Y	100:01:00	150 ó 125
14 400/24 940Y	120:01:00	150 ó 125

Fuente: IEEE C57.13. *IEEE Standard Requirements for Instrument Transformers.* p.24.

Figura 20. **Conexión típica del primario grupo 1**



Fuente: IEEE C57.13. *IEEE Standard Requirements for Instrument Transformers.* p. 25.

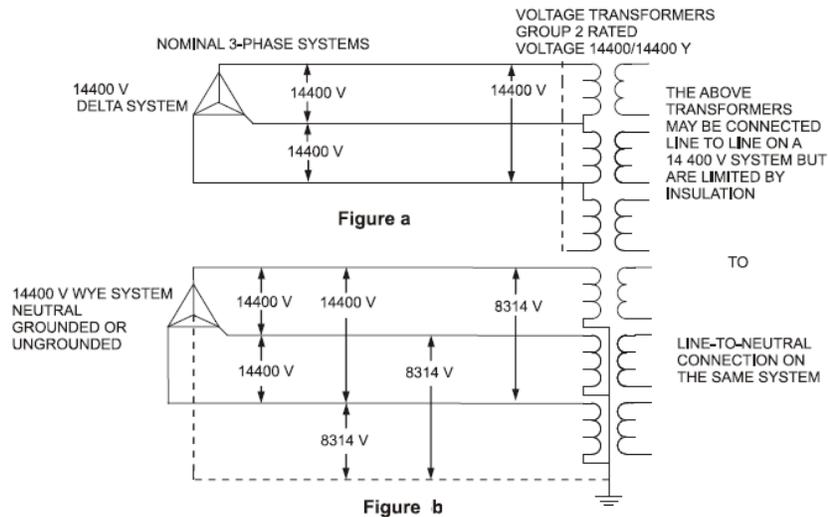
Grupo 2: Transformadores que pueden instalarse entre fases o entre fase y tierra, ambos en una red de tensión  $U_p$ .

Tabla XXIII. **Grupo 2, Voltajes primarios nominales y relación**

Voltaje Nominal (V)	Relación	Nivel Básico al Impulso (kV crest)
120/120Y	01:01	10
240/240Y	02:01	10
300/300Y	2.5:1	10
480/480Y	04:01	10
600/600Y	05:01	10
2400/4160Y	20:01	45
4800/4800Y	40:01:00	60
7200/7200Y	60:01:00	75
12000/12000Y	100:01:00	110 ó 95
14400/14400Y	120:01:00	110 ó 95
24000/24000Y	200:01:00	150 ó 125
34500/34500Y	300:01:00	200 ó 150
46000/46000Y	400:01:00	250
69000/69000Y	600:01:00	350

Fuente: IEEE C57.13. *IEEE Standard Requirements for Instrument Transformers*. p. 25.

Figura 21. **Conexión típica del primario grupo 2**



Fuente: IEEE C57.13. *IEEE Standard Requirements for Instrument Transformers*. p. 26.

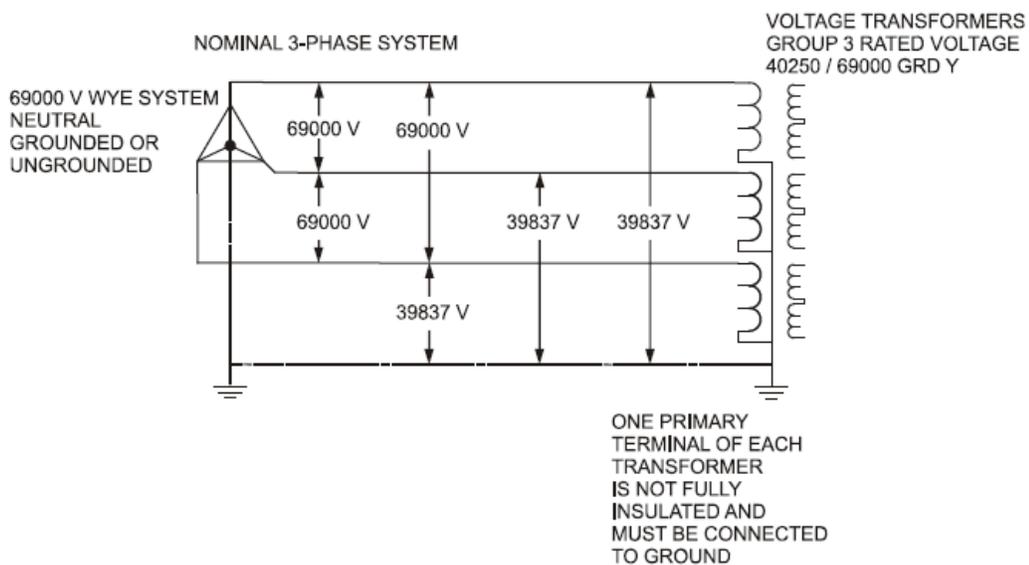
Grupo 3-4-5: transformadores que solamente pueden instalarse entre fase y tierra.

Tabla XXIV. **Grupo 3, Voltajes primarios nominales y relación**

Voltaje Nominal (V)	Relación	Nivel Básico al Impulso (kV crest)
14 400/24 940 Grd Y	120/200 & 120/200:1	150 or 125
20 125/34 500 Grd Y	175/300 & 175/300:1	200
27 600/46 000 Grd Y	240/400 & 240/400:1	250
40 250/69 000 Grd Y	350/600 & 350/600:1	350
69 000/115 000 Grd Y	600/1000 & 600/1 000:1	550 o 450
80 500/138 000 Grd Y	700/1200 & 700/1 200:1	650 o 550
92 000/161 000 Grd Y	800/1400 & 800/1 400:1	750 o 650
138 000/230 000 Grd Y	1 200/2 000 & 1 200/2 000:1	1 050 o 900
207 000/345 000 Grd Y	1 800/3 000 & 1 800/3 000:1	1 300 o 1 175
287 500/500 000 Grd Y	2 500/4 500 & 2 500/4 500:1	1 800 o 1 675
431 250/750 000 Grd Y	3 750/6 250 & 3 750/6 250:1	2 050

Fuente: IEEE C57.13. *IEEE Standard Requirements for Instrument Transformers*. p. 26.

Figura 22. **Conexión típica del primario grupo 3**



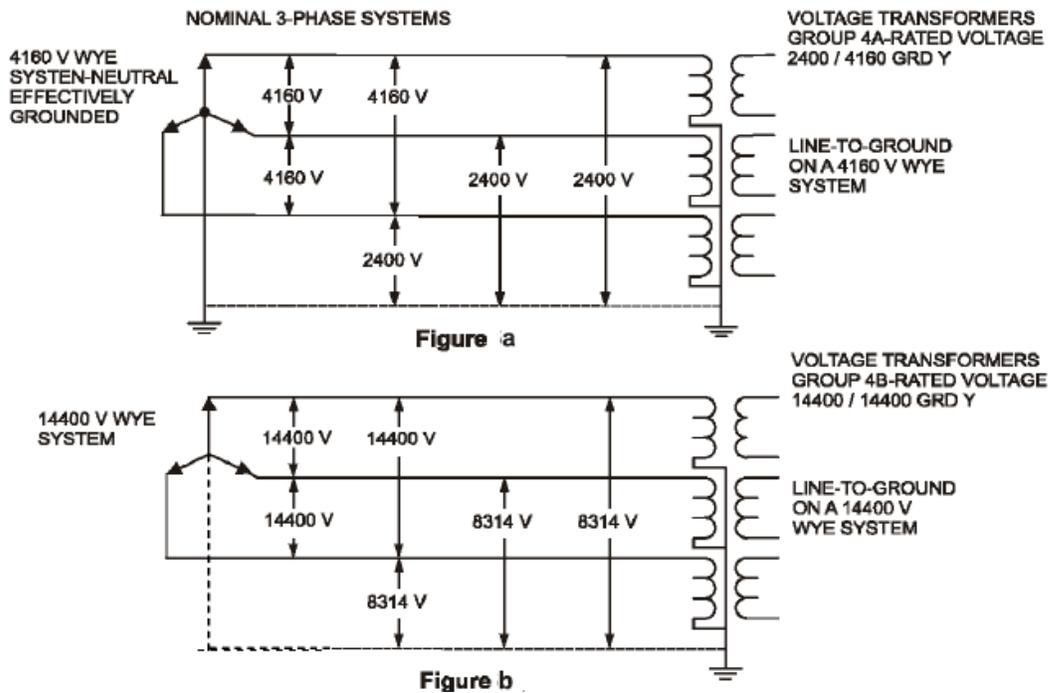
Fuente: IEEE C57.13. *IEEE Standard Requirements for Instrument Transformers*. p. 27.

Tabla XXV. **Grupo 4, Voltajes primarios nominales y relación**

Grupo	Voltaje nominal (V)	Relación	Nivel Básico al impulso (kV crest)
Grupo 4A: Para operaciones aproximadamente al 100% del voltaje nominal	2400/4160 Grd Y	20:1	60
	4200/7200 Grd Y	35:1	75
	4800/8320 Grd Y	40:1	75
	7200/12470 Grd Y	60:1	110 ó 95
	8400/14400 Grd Y	70:1	110 ó 95
Grupo 4B: Para operaciones aproximadamente al 58% del voltaje nominal	4160/4160 Grd Y	35:1	60
	4800/4800 Grd Y	40:1	60
	7200/7200 Grd Y	60:1	75
	12000/12000 Grd Y	100:1	110 ó 95
	14400/14400 Grd Y	120:1	110 ó 95

Fuente: IEEE C57.13. *IEEE Standard Requirements for Instrument Transformers*. p. 27.

Figura 23. **Conexión típica del primario grupo 4**



Fuente: IEEE C57.13. *IEEE Standard Requirements for Instrument Transformers*. p.28.

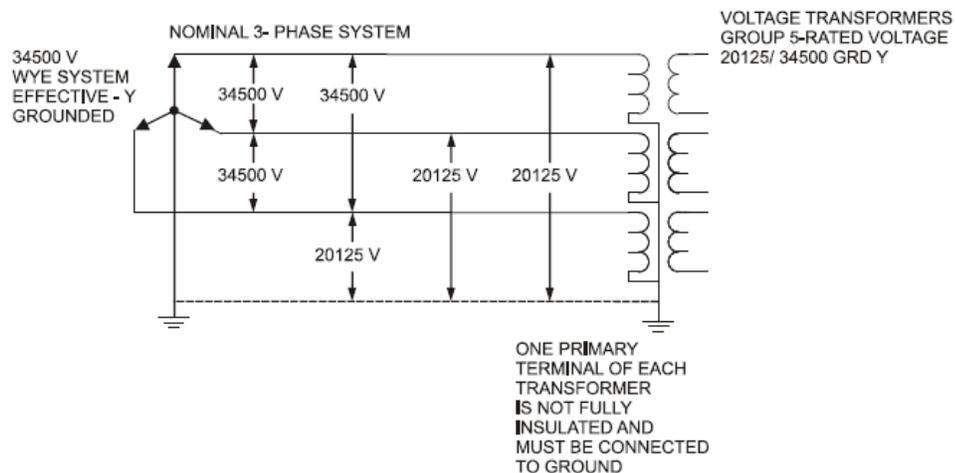
En el grupo 5 son utilizados únicamente para uso en interiores en sistemas aterrizados, donde deberá ser capaz de operar a 140 % del voltaje nominal sin exceder los 175 °C de incremento de temperatura para cobre ó 125 °C de incremento para el aluminio. Este grupo también deberá de ser capaz de una operación continua a 110 % del voltaje nominal con el burden donde no deberá de exceder el burden térmico nominal.<sup>41</sup>

Tabla XXVI. **Grupo 5, Voltajes primarios nominales y relación**

Voltaje nominal (V)	Relación	Nivel Básico al impulso (kV crest)
7200/12470 Grd Y	60:1	110
8400/14000 Grd Y	70:1	110
12000/20780 Grd Y	100:1	150 ó 125
14400/24940 Grd Y	120:1	150 ó 125
20125/34500 Grd Y	175:1	200 ó 150

Fuente: IEEE C57.13. *IEEE Standard Requirements for Instrument Transformers*. p. 28.

Figura 24. **Conexión típica del primario grupo 5**



Fuente: IEEE C57.13. *IEEE Standard Requirements for Instrument Transformers*. p. 28.

<sup>41</sup> IEEE Power Engineering Society. *IEEE C57.13 Standard Requirements for Instrument Transformers*. p. 28.

### 3.3. Tensión nominal secundaria

La IEC especifica que el voltaje nominal secundario deberá ser escogido acorde con el lugar donde será utilizado. Los valores para transformadores monofásicos utilizados en redes monofásicas, o conectados línea-línea en redes trifásicas y para transformadores trifásicos los clasifica de la siguiente.

- Basados en la práctica actual de un grupo de países europeos
  - 100V y 110V
  - 200V para circuitos secundarios extendidos
- Basados en la práctica de los Estados Unidos y Canadá
  - 120V para redes de distribución
  - 115V para redes de transmisión
  - 230V para los circuitos secundarios extendidos

Para los transformadores monofásicos destinados a ser utilizados entre fase y tierra, en sistemas trifásicos donde el voltaje nominal primario es un número dividido por  $\sqrt{3}$ , la tensión secundaria nominal debe ser uno de los valores mencionados, dividido por  $\sqrt{3}$ , sin alterar el valor de la relación nominal de vueltas del transformador.<sup>42</sup>

### 3.4. Relación de transformación

Se hace lo posible para que la relación de transformación tenga un valor entero. Las normas IEC-UNE recomiendan que la relación nominal de transformación sea uno de los siguientes valores:

---

<sup>42</sup> International Electrotechnical Commission IEC. *Instrument transformers –Part 2: Inductive voltage transformers*, IEC 60044-2. p. 27.

10-12-15-20-25-30-40-50-60-80 y sus múltiplos decimales.

La norma UNE acepta también la relación 36 para el nivel 420 kV. <sup>43</sup>

Las relaciones de transformación conforme a la IEEE se muestran en las tablas de voltaje primario, donde aparece también la relación para cada grupo de conexión.

### **3.5. Potencia de precisión**

La norma IEC 60044-2, establece los valores de la potencia de precisión con factor de potencia 0,8 en retraso, expresados en voltiamperios, son:

10-15-25-30-50-75-100-150-200-300-400-500,

Donde se prefieren los valores subrayados. La potencia nominal de un transformador trifásico, será la potencia nominal por fase.<sup>44</sup>

La norma IEEE/ANSI admite las cargas de precisión indicadas en la siguiente tabla:

---

<sup>43</sup> Electrónica Artech Hermanos S.A. *Introducción a los transformadores de medida*. p. 56.

<sup>44</sup> International Electrotechnical Commission IEC. *Instrument transformers –Part 2: Inductive voltage transformers*, IEC 60044-2. p. 28.

Tabla XXVII. **Burdens standard** para transformadores de voltaje IEEE/ANSI

Características de los burdens standard			Características a 120 V base			Características a 69. V base		
Designación	VA	Factor de potencia	Resistencia (Ω)	Inductancia (Ω)	Impedancia (Ω)	Resistencia (Ω)	Inductancia (Ω)	Impedancia (Ω)
W	12.50	0.10	115.2	3.04	1152.0	38.4	1.01	384
X	25.00	0.70	403.2	1.09	576.0	134.4	0.36	192
M	35.00	0.20	82.3	1.07	411.0	27.4	0.36	137
Y	75.00	0.85	163.2	0.27	192.0	54.4	0.09	64
Z	200.00	0.85	61.2	0.10	72.0	20.4	0.03	24
ZZ	400.00	0.85	30.6	0.05	36.0	10.2	0.02	12

Fuente: IEEE C57.13. *IEEE Standard Requirements for Instrument Transformers*. p. 29.

Donde:

La característica de los *burdens* es aplicable a 60Hz.

La tolerancia de impedancia es de +5% y -0%

Los voltajes nominales del secundario van de 108 V a 132 V o de 62.4 V a 76.2V.

Los *burdens* estándares para pruebas de exactitud deben de estar dentro de  $\pm 10$  % del voltaje nominal secundario.

### 3.6. Factores de tensión

Es el factor por el cual hay que multiplicar el voltaje primario asignado, para calcular la tensión máxima para la que el transformador tenga que actuar a las especificaciones de calentamiento, durante el tiempo indicado, y la precisión. Este también depende del sistema y de la condición de puesta a tierra del devanado primario.

En la siguiente tabla se indican los valores normalizados del factor de tensión admitidos por las normas IEC.

Tabla XXVIII. **Valores normales del factor de tensión asignado**

Factor de tensión	Tiempo asignado	Modo de conectar el arrollamiento primario y condiciones del sistema de puesta a tierra
1,2	Continuo	Entre fase, en cualquier red. Entre el punto neutro de los transformadores en estrella y tierra, en cualquier red.
1,2	Continuo	Entre fase y tierra en una red con neutro efectivamente puesto a tierra (apartado 4.23)
1,5	30 s	
1,2	Continuo	Entre fase y tierra en una red con neutro no efectivamente puesto a tierra (apartado 4.23 b) con eliminación automática del defecto a tierra.
1,9	30 s	
1,2	Continuo	Entre fase y tierra en una red con neutro aislado (apartado 4.20), sin eliminación automática del defecto a tierra, o en una red compensada por bobina de extinción
1,9	8h	

Fuente: Electrónica Artech Hermanos S.A. *Introducción a los transformadores de medida.*

p.56.

La norma IEEE/ANSI indica un factor de voltaje 1,1 para todos los transformadores de tensión en general, con respecto al calentamiento y a la precisión. Para transformadores Grupo 1 y 3, se llegan a valores de tensión de 1,25 en servicio continuo y 1,73 durante 1 minuto, bajo ciertas condiciones de temperatura.<sup>45</sup>

### 3.7. Límite de calentamiento

En las normas IEC y UNE el calentamiento del transformador en régimen de funcionamiento normal no excederá los valores correspondientes a su clase de asilamiento para un factor de tensión 1,2. Asimismo si tiene un factor de tensión 1,5 o 1,9, deberán ser ensayados a la tensión resultante durante el tiempo indicado en la tabla18, el factor de voltaje, partiendo de las condiciones térmicas estables alcanzadas a 1,2 veces la tensión primaria asignada, sin sobrepasar en 10°C el aumento de temperatura admisible.<sup>46</sup>

<sup>45</sup> Electrónica Artech Hermanos S.A. *Introducción a los transformadores de medida.* p. 57.

<sup>46</sup> International Electrotechnical Commission IEC. *Instrument transformers –Part 2: Inductive voltage transformers*, IEC 60044-2. p. 27.

### 3.8. Polaridad y marcado de terminales

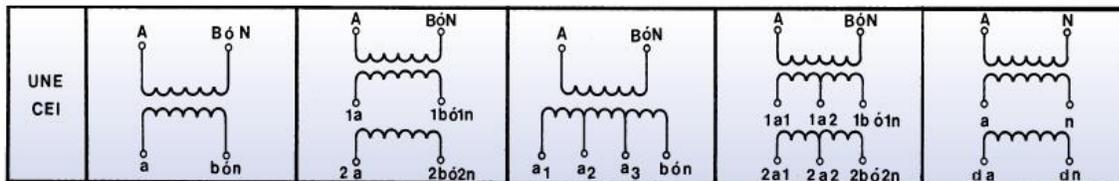
La norma IEC 60044-2 establece estas reglas tanto para transformadores monofásicos, como transformadores trifásico ensamblados en una unidad.

Se identificará los bornes primarios con las letras mayúsculas A, B, C y N y con las letras minúsculas a, b, c, y n para las terminales secundarias.

Las letras A, B, C, denotan terminales aisladas completamente y N denota una terminal para aterrizar con un asilamiento el cual es menor a las otras.

De acuerdo con la norma IEC se muestran algunos ejemplos:

Tabla XXIX. **Marcado de terminales IEC 60044-1**



Fuente: Electrónica Artech Hermanos S.A. *Introducción a los transformadores de medida.*

p. 57

Para ver las distintas graficas de los transformadores trifásicos se recomienda ver las figuras 6 a 15 de la norma IEC 60044-2.

Para la polaridad se tendrá en consideración que las terminales con letra mayúscula correspondientes a las letras minúsculas tendrán la misma polaridad en el mismo instante.<sup>47</sup>

<sup>47</sup> International Electrotechnical Commission IEC. *Instrument transformers –Part 2: Inductive voltage transformers*, IEC 60044-2. p. 71.

De acuerdo con la norma IEEE C57.13 el marcado de terminales y la polaridad para los transformadores de tensión aplican las mismas especificaciones que los bornes de los transformadores de intensidad.

### **3.9. Placa de datos**

La IEC 60044-2 establece los requerimientos mínimos que deberá llevar la placa de datos.

- Nombre del fabricante.
- Número de serie.
- Tipo de aparato.
- Voltajes nominales primarios y secundarios.
- Frecuencia nominal.
- Potencia nominal y su correspondiente clase de precisión y la designación de los bornes correspondientes a cada devanado tanto primario como secundario.
- Voltaje máximo del sistema (ejemplo 72,5 kV).
- Nivel de aislamiento asignado, (ejemplo 140/325 kV).
  - Además las siguientes informaciones deberán estar en la placa de datos si tuviese algún lugar disponible:
- El factor de tensión asignado y su correspondiente tiempo nominal.
- Clase de aislamiento, si es diferente de la clase A.<sup>48</sup>

Conforme a la norma IEEE/ANSI C57.13 en la placa de datos deberán aparecer los siguientes:

---

<sup>48</sup> International Electrotechnical Commission IEC. *Instrument transformers –Part 2: Inductive voltage transformers* IEC 60044-2. p. 69.

- Nombre de fabricante.
- Tipo de aparato.
- Número de serie (SER).
- Voltajes nominales primarios y secundarios.
- Relación o relaciones.
- Nivel básico al impulso (BIL kV).
- Frecuencia nominal (Hz).
- Potencia de carga térmica a temperatura ambiente, en VA en grados Celsius.
- Exactitud de relación.

### **3.10. Resistencia de transformadores de tensión a cortocircuitos**

Al momento que se produce un cortocircuito en los bornes secundarios el transformador sufre esfuerzos mecánicos y térmicos.

La mayor parte de norma UNE, IEC e IEEE/ANSI establecen que todo transformador de potencial debe soportar, sin sobrepasar ciertos límites de temperatura, un cortocircuito durante 1 segundo, cuando esté alimentado con el voltaje asignado.<sup>49</sup>

### **3.11. Transformadores de tensión para medida**

Son transformadores de tensión destinados a alimentar dispositivos de medida, medidores y otros aparatos análogos.

---

<sup>49</sup> Electrónica Artech Hermanos S.A. *Introducción a los transformadores de medida*. p. 58.

### 3.11.1. Clase de precisión

La IEC establece que la clase de precisión de un transformador de voltaje para medición, se especifica por un número (índice de clase) que es el límite del error de relación, expresado en porcentaje, para el voltaje nominal primario estando alimentado el transformador con la “carga de precisión”.

La precisión se debe mantener para un voltaje comprendido entre el 80 % y el 120 % de la tensión nominal con una carga comprendida entre el 25 % y el 100 % de la carga de precisión.

Las clases de precisión para los transformadores de tensión son: 0,1, 0,2, 0,5 1 y 3.<sup>50</sup>

Tabla XXX. **Guía de aplicación de transformadores de voltaje**

Clase 0,1	Laboratorio.
Clase 0,2	Laboratorio, patrones portátiles, medidores de gran precisión.
Clase 0,5	Medidores normales y aparatos de medida.
Clase 1	Aparatos de cuadro.
Clase 3	Para usos en los que no se requiere alta precisión.

Fuente: Electrónica Artech Hermanos S.A. *Introducción a los transformadores de medida*. p. 26.

La IEEE las clasifica de la siguiente manera: 0,3, 0,6, 1,2. Estos al igual que los transformadores de corriente contienen otra clasificación de alta exactitud que pasan a denominarse clases 0,15 y 0,15s acorde con la norma IEEE C57.13.6.

---

<sup>50</sup> Electrónica Artech Hermanos S.A. *Introducción a los transformadores de medida*. p. 12.

### 3.11.2. Límites de error de relación en los transformadores de tensión para medida

De acuerdo con la norma IEC 60044-2 la clase de precisión de un transformador de tensión tanto el error de voltaje como el desplazamiento de fase, a frecuencia nominal, no deberán exceder los valores límites de la tabla 31.

Teniendo en cuenta que la tensión debe estar comprendida entre el 80 y 120 % de la tensión asignada y para todas las cargas comprendidas entre 25 y 100 % de la precisión, bajo un factor de potencia de 0,8 en atraso.

La siguiente tabla muestra los límites de error de relación y de fase en función de la clase de precisión.

Tabla XXXI. Límites de error de voltaje y desfase de transformadores de voltaje para medición

Clase de precisión	Error de relación ± %	Desfase ±	
		Minutos	centirradiares
0,1	0,1	5	0,15
0,2	0,2	10	0,3
0,5	0,5	20	0,6
1	1,0	40	1,2
3	3,0	No especificado	No especificado

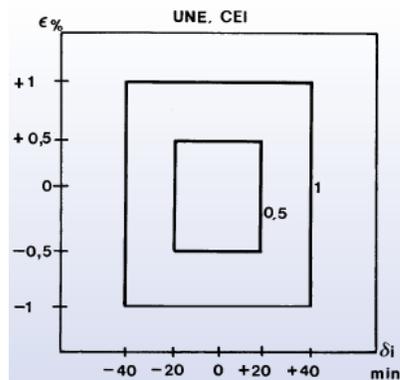
Fuente: IEC 60044-2. *Instrument transformers –Part 2: Inductive voltage transformers*. p. 73.

Para transformadores de voltaje con exactitud 0,1 y 0,2 teniendo un *burden* nominal menor a 10VA se puede especificar un rango extendido. El error de voltaje y desplazamiento de fase no deberán exceder los valores que se muestran

en la tabla anterior, cuando el *burden* secundario esta entre 0 y 100 % del *burden* nominal con un factor de potencia igual a 1.

En la figura aparece una gráfica de los límites de error de la norma IEC, para las clases de precisión 0,5 y 1.

Figura 25. Límites de error clase de precisión 0,5 y 1



Fuente: Electrónica Artech Hermanos S.A. *Introducción a los transformadores de medida.* p. 60.

La norma IEEE C57 establece las siguientes clases de precisión y sus límites de error de relación donde la carga medida debe de tener un factor de potencia de 0,6 a 1 en retraso.

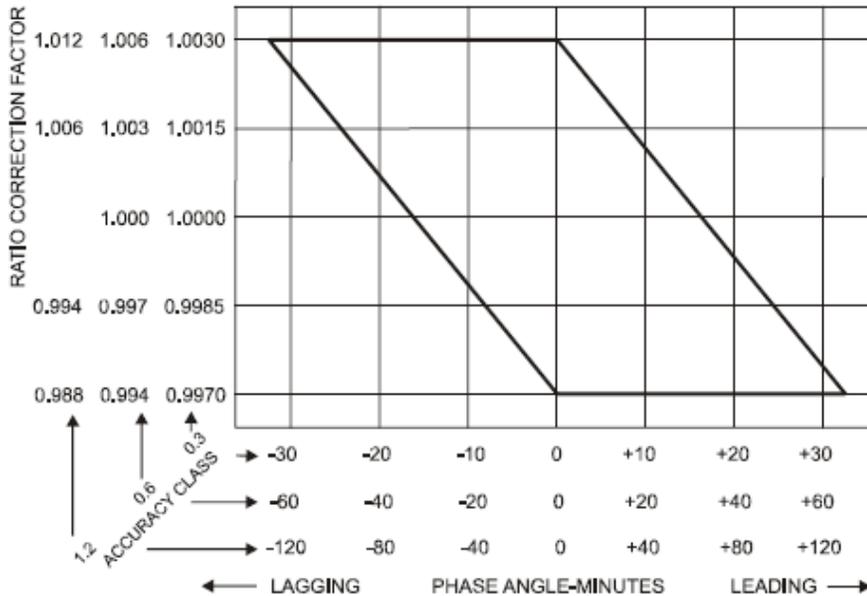
Tabla XXXII. Límites de error de relación

Clase de precisión	Transformadores de voltaje (90% al 110% del voltaje nominal)	
	Mínimo	Máximo
0,3	0,997	1,003
0,6	0,994	1,006
1,2	0,988	1,012

Fuente: IEEE C57.13. *IEEE. Standard Requirements for Instrument Transformers.* p.13.

Los errores máximos admisibles en la norma IEEE/ ANSI corresponden a los puntos situados dentro de los paralelogramos de la siguiente figura.

Figura 26. Límites de clase de exactitud para TT de medición



Fuente: IEEE C57.13. *IEEE. Standard Requirements for Instrument Transformers*

p. 14

Estas deben cumplirse para todas las cargas, desde 0 hasta la nominal, para voltajes comprendidos entre 90 % y 110 % del voltaje nominal, con un factor de potencia que puede variar entre 0,6 en retraso y 1.

### 3.12. Transformadores de tensión para protección

Son transformadores de voltaje que se utilizan para la alimentación de relés de protección.

Si se utiliza un TT para medición y protección, no es necesario que existan dos devanados separados como los TI a menos que se desee una separación

galvánica. En la norma IEC a los TT de protección se especifica que también cumplan la clase de precisión como TT para medición.

Para un mismo modelo de TT, la potencia de precisión, cuando solo existe un secundario, es superior a la suma de las potencias de precisión de cada secundario, cuando existen dos, ya que se toma en cuenta el espacio destinado a aislar entre sí ambos arrollamientos secundarios.

Se denomina “devanado de voltaje residual”, al que es utilizado para formar un triángulo abierto (junto con los correspondientes devanados de otros dos transformadores monofásicos), para que suministre un voltaje residual en caso de que no tenga la tierra.

Ya que existe una interdependencia entre los secundarios de un TT, se debe especificar si las potencias de precisión son simultáneas o no, puesto que si uno de los secundarios tiene carga solamente durante cortos periodos de tiempo, se puede determinar que las cargas no son simultáneas.<sup>51</sup>

### **3.12.1. Clase de precisión**

Bajo la normativa IEC 60044-2 los transformadores de protección, salvo los devanados de tensión residual, deben especificarse también como transformador de potencial para medida.

La clase de precisión, se establece por un número que indica el error máximo, expresado en tanto por ciento al 5 % del voltaje nominal. Este número va seguido de la letra “P”.

---

<sup>51</sup> Electrónica Artech Hermanos S.A. *Introducción a los transformadores de medida*. p. 27.

Las clases de precisión normales son: 3P Y 6P

Conforme a la IEEE las clases de precisión deberán asignarse para cada *burden* estándar nominal. La precisión puede estar fijado para el *burden* máximo para el cual está clasificado lo cual implicaría que todas las demás cargas estarán en esa clase, por ejemplo 0,3 Z implicaría que las clases 0,3 W, X, M, Y y Z, estarán en la clasificación del *burden* Z. Si la clase es diferente a otros *burden*, se indicará de la siguiente manera: 0,3, 0,6Z y 1.2ZZ, o pueden especificarse para un valor específico de *burden* estándar, por ejemplo, un 0.3 @ Y, la precisión se garantiza únicamente para este valor de *burden*.

Para transformadores con dos devanados secundarios, la carga en cualquiera de los dos terminales del secundario la exactitud se ve afectada en todos los terminales. La clase de precisión se designará con la carga dividida en cualquier manera entre las salidas del secundario.<sup>52</sup>

### **3.12.2. Carga**

Se define de la misma manera que el transformador de intensidad.

### **3.12.3. Límite de error de relación en los transformadores de tensión para protección**

La norma IEC admite las clases y límites que se muestran en la siguiente tabla.

---

<sup>52</sup> IEEE Power Engineering Society. *IEEE C57.13 Standard Requirements for Instrument Transformers*. p. 30.

Tabla XXXIII. **Límites de error de voltaje y desfase de transformadores de voltaje para protección**

Clase de precisión	Error de relación ± %	Desfase ±	
		Minutos	centirradiares
3P	3,0	120	3,5
6P	6,0	240	7,0

Fuente: IEC 60044-2. *Instrument transformers –Part 2: Inductive voltage transformers*. p. 75.

Los errores no deberán sobrepasar los valores de la tabla al 5 % de la tensión asignada, y al producto del valor asignado por el factor de tensión (1,2; 1,5; o 1,9) para cualquier carga comprendida entre el 25 y el 100 % de la carga nominal con un factor de potencia de 0,8 inductivo.

Al 2 % del voltaje nominal, los límites de error serán dos veces de los que están al 5 % de la tensión nominal. (dos veces el error que aparecen en la tabla anterior).

### **3.13. Transformadores de tensión de realización especial**

Algunos fabricantes como Artech ofrecen las siguientes clases de realización especial, donde se requieren especificaciones importantes.

#### **3.13.1. Transformadores con varias tensiones primarias nominales**

Se pueden realizar de las siguientes formas:

- Acoplamiento serie-paralelo en el primario
- Bobinado primario con tomas

- Acoplamiento serie-paralelo en el secundario
- Bobinado secundario con tomas

Las primeras dos presentan problemas de aislamiento y aprovechamiento del núcleo, el cual limita el campo magnético en baja tensión.

Para el serie-paralelo en el secundario, es exclusivo para utilizarse si las dos secciones del arrollamiento secundario tienen el mismo número de espiras, ya que, de no ser así, se presenta una corriente de circulación interna, absorbiendo potencia, asimismo hay que tener en cuenta que ambos devanados deben aislarse entre sí, al menos a 2kV.

Finalmente, la realización por toma en el secundario, es realizada cuando no es posible la realización serie-paralelo o cuando la potencia necesitada es la misma para las dos realizaciones, con lo que se aprovecha el núcleo al máximo. Se recomienda consultar con el fabricante para que estudie la factibilidad económica.

### **3.13.2. Transformadores con varias tensiones secundarias nominales**

Se realizan de dos maneras:

- Acoplamiento serie-paralelo en el secundario
- Bobinado secundario con toma

El acoplamiento serie-paralelo en el secundario, sólo es utilizable para la relación 2 a 1 y se conserva todas las características del transformador normal en cuanto a sus posibilidades.

La realización con toma en el secundario, se utiliza cuando la relación de tensiones no es 2 a 1.

### **3.13.3. Transformadores en cascada**

Se utiliza cuando el voltaje nominal de aislamiento del transformador de potencial es elevado, lo cual resulta difícil realizar en una sola bobina.

La construcción en cascada consiste en repartir el arrollamiento primario en varias bobinas, donde el secundario o los secundarios se encuentran en la última bobina. La distribución en cascada hace posible que cada bobina sufra solamente una fracción de la tensión total.

Este transformador se forma de uno o varios núcleos con dos bobinas cada uno, el núcleo de forma rectangular, se pone a la mitad del de las dos bobinas.

### **3.13.4. Transformadores con varios arrollamientos secundarios**

Se puede realizar transformadores de voltaje con varios devanados secundarios sobre el mismo núcleo, aunque la carga de uno de estos afecta a los restantes no tiene las limitaciones del transformador de intensidad, donde los factores de seguridad y saturación son claves.

En los transformadores de voltaje, con el P2 conectado a tierra, que sea utilizado en redes sin neutro a tierra, es conveniente realizar un terciario (segundo secundario) para proteger al transformador, si aparece el fenómeno de

ferroresonancia. El aumento en el precio que un devanado secundario genera al transformador es ligeramente costoso.<sup>53</sup>

### **3.14. Transformadores de tensión para descarga de líneas**

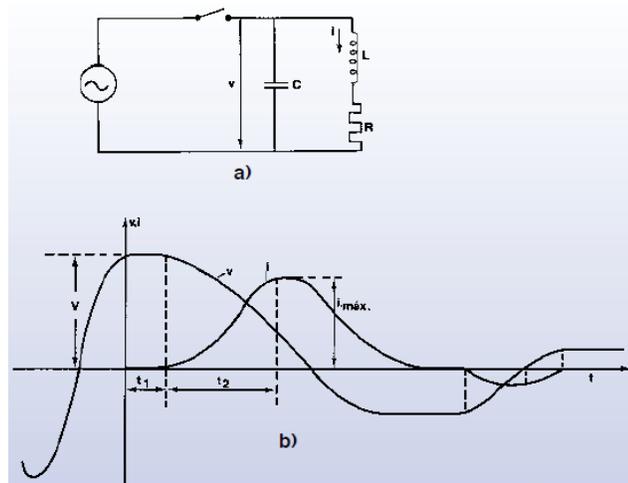
Al momento de que una línea de alta tensión queda aislada por la apertura de los interruptores de potencia, la energía capacitiva almacenada en ellas puede ser causa de sobretensiones al momento del reenganche. Hay diversos procedimientos para la descarga de líneas, pero la experiencia ha demostrado que los TT tienen buenos resultados si están correctamente dimensionados, caso contrario puede que la descarga no sea tan rápida o que los TT se deterioren por calentamiento o por efectos dinámicos.

Por ejemplo, cuando un TT no está saturado, la corriente de descarga es depreciable, y el voltaje de la línea es constante. Cuando está saturado, la reactancia decrece al valor del arrollamiento primario en el aire,  $L$ . En estas condiciones se considera el circuito de la siguiente figura inciso a), donde  $C$  es la capacitancia de la línea y  $R$  la resistencia del devanado primario del TT.

---

<sup>53</sup> Electrónica Artech Hermanos S.A. *Introducción a los transformadores de medida*. p. 29.

Figura 27. Transformador de tensión, periodo transitorio



Fuente: Electrónica Artech Hermanos S.A. *Introducción a los transformadores de medida.*  
p. 30.

Si  $R^2C > 4L$ , la descarga es aperiódica y lenta

Si  $R^2C < 4L$ , la descarga es oscilante, como se muestra en la figura b

La energía almacenada en la línea se invierte en calentar al devanado primario del transformador de tensión de la siguiente manera:

$$W = \frac{1}{2} CV^2$$

Donde V es el voltaje de línea al momento de la apertura.

En los esfuerzos mecánicos hay que tomar en consideración el valor máximo de la intensidad de descarga. Para el caso oscilante es:

$$I_{max} = \frac{V}{LW_1} e^{-\frac{Rt}{4LW_1}}$$

Donde  $w_1 = \frac{\sqrt{4l-R^2C}}{2LC}$  es la pulsación natural del circuito.

Para el cálculo de los tiempos  $t_1$  (saturación del TT) y  $t_2$  se pueden utilizar las siguientes fórmulas:

$$t_1 = \frac{B \text{ Sat} \times N1 \times S}{V} \times 10^{-8}$$

$$t_2 = \frac{\pi}{2w_1}$$

Donde: B sat = inducción en saturación (Gauss)

N1= número de espiras del devanado primario

S = sección del núcleo ( $cm^2$ )

V = voltaje inicial de descarga (V).<sup>54</sup>

### 3.15. Sobretensiones

Un TT se encuentra sometido, como todos los aparatos instalados en el lado de alta tensión, a una serie de sobretensiones que debe soportar sin que se altere su aislamiento. Los transformadores (tanto de tensión como intensidad) se ensayan durante un minuto a la tensión de ensayo a frecuencia industrial, y está capacitado para soportar la tensión de ensayo con onda de choque que corresponde a su nivel de aislamiento.

Por ejemplo un transformador de medida, de voltaje nominal de aislamiento 72,5 kV eficaces, que tienen en servicio una tensión  $U_s = 72,5/\sqrt{3} =$

---

<sup>54</sup> Electrónica Artech Hermanos S.A. *Introducción a los transformadores de medida*. p. 31.

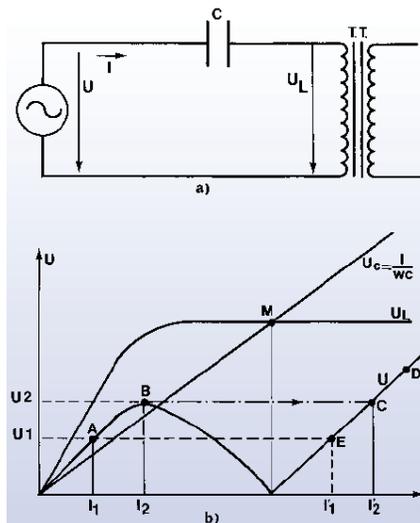
42 kV eficaces, se ensaya a 140 kV eficaces ( $3,3 U_s$ ) durante un minuto y soporta 325 kV cresta ( $5,5 U_s$ ) del impulso tipo rayo.

En los transformadores de voltaje usualmente aparece el fenómeno de ferresonancia ya sea serie o paralelo, el cual depende de las características red-transformador, originándose de tipo monofásico o trifásico, y a frecuencia fundamental, armónica o subarmónica.<sup>55</sup>

### 3.15.1. Ferresonancia serie

En la siguiente figura se muestra un circuito donde están en serie la capacidad C y la inductancia saturable del transformador de tensión, el valor de C es tal que la recta  $1/wC$  corta  $U_L$  en el punto M (fig. b).

Figura 28. Ferresonancia en serie



Fuente: Electrónica Artech Hermanos S.A. *Introducción a los transformadores de medida.*

p. 32

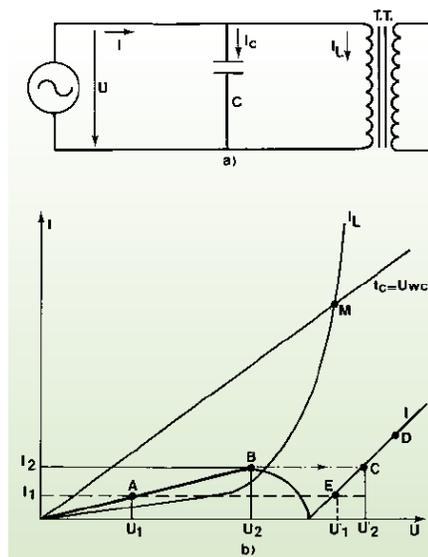
<sup>55</sup> Electrónica Artech Hermanos S.A. *Introducción a los transformadores de medida.* p. 31.

Si el voltaje nominal es  $U_1$ , el punto de funcionamiento es A con una intensidad  $I_1$ . Al momento de producirse una sobretensión superior a  $U_2$ , del punto A pasa al punto D, a través de B y C. Al bajar de nuevo la tensión a  $U_1$  el nuevo punto de equilibrio es E, donde  $I'_1 \gg I_1$ . Si el tiempo de duración de sobrecarga es grande el TT se calienta notablemente, el cual puede llegar a quemarse.<sup>56</sup>

### 3.15.2. Ferorresonancia paralelo

En la siguiente figura se muestra un circuito paralelo. Al analizar la ferorresonancia, suponemos que el punto de equilibrio  $I = I_1$ . Debido a una sobretensión o sobreintensidad se pasa al punto D y luego al E, a través de B y C, donde  $U'_1 \gg U_1$  y se produce una sobretensión permanente.

Figura 29. Ferorresonancia paralelo



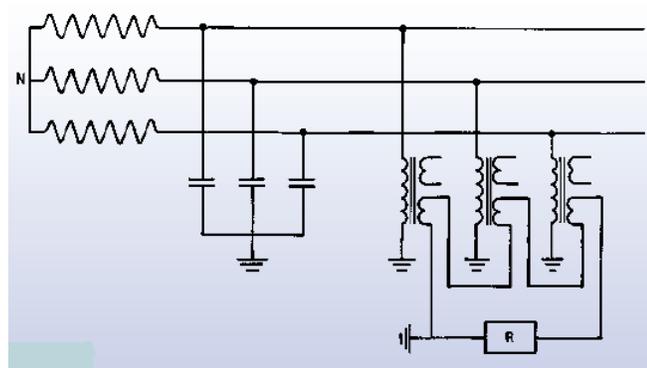
Fuente: Electrónica Artech Hermanos S.A. Introducción a los transformadores de medida.

<sup>56</sup> Electrónica Artech Hermanos S.A. *Introducción a los transformadores de medida.* p. 31.

Para que aparezca este fenómeno en una red trifásica es necesario que el neutro esté aislado. El desplazamiento del neutro respecto a tierra provoca que en uno o dos TT aparezca una sobretensión que puede ser superior a la compuesta.

Para amortiguar este efecto, es necesario colocar una resistencia de valor adecuado en triangulo abierto a los terciarios de los TT como se muestra en la siguiente figura. Un valor normal esta entre 25 y 50 Ohmios.<sup>57</sup>

Figura 30. **Conexión para amortiguar la ferro-resonancia paralelo**



Fuente: Electrónica Artech Hermanos S.A. *Introducción a los transformadores de medida.*

p. 33

### 3.16. **Funcionamiento del transformador de tensión con el secundario en cortocircuito**

Se denomina “potencia de calentamiento” de un TT a la máxima potencia que puede proveer en régimen permanente, sin que supere los límites de calentamiento, cuando el voltaje secundario es nominal. Si la carga en el secundario es mayor a la correspondiente, el TT puede deteriorarse si no se limita el tiempo de funcionamiento.

<sup>57</sup> Electrónica Artech Hermanos S.A. *Introducción a los transformadores de medida.* p. 32.

Cuando el secundario está en cortocircuito, la corriente secundaria se limita únicamente por la impedancia interna del TT, por lo que el tiempo que el TT puede funcionar en estas condiciones es muy corta. En las normas (UNE, IEEE/ANSI), se establece que este tiempo sea como mínimo 1 segundo.

Se puede resguardar el transformador de potencial, utilizando fusibles o disyuntores en el circuito secundario, teniendo en cuenta que una falla en éstas puede dar lugar a un funcionamiento inadecuado del sistema de protección de la subestación.<sup>58</sup>

### **3.17. Elección del transformador de tensión**

Al momento de seleccionar un transformador de tensión es necesario tener en cuenta los siguientes puntos:

- Normativa o estándar (IEC o IEEE).
- Tipo de instalación, interior o intemperie, teniendo en cuenta la altura, para valores superiores a 1,000 m sobre el nivel del mar.
- Temperatura ambiente.
- Tensión nominal primaria y nivel de aislamiento (BIL).
- Relación de transformación nominal.
- Clase de precisión.
- Tensión nominal secundaria.
- Carga nominal.
- Potencia de precisión.
- Factor de tensión.
- Frecuencia nominal.

---

<sup>58</sup> Electrónica Artech Hermanos S.A. *Introducción a los transformadores de medida*. p. 33.

- Número de secundarios.
- Detalles constructivos.



## **4. OTROS TIPOS DE TRANSFORMADORES DE MEDIDA**

Usualmente fabricantes clasifican los siguientes tipos de transformador de medida electrónicos de la siguiente manera:

### **4.1. Transformadores de medida electrónicos**

El precio de un transformador de medida de alta tensión y específicamente los de muy alta tensión de tipo convencional se debe al aislamiento dieléctrico entre alta tensión y tierra, por lo que hace varios años se han desarrollado TM cuya característica común es que del lado de alta tensión únicamente reciben información y no potencia, como lo hace un transformador de medida convencional. En los TM electrónicos, la potencia suministrada al circuito secundario proviene de una fuente de alimentación exterior, de baja tensión.

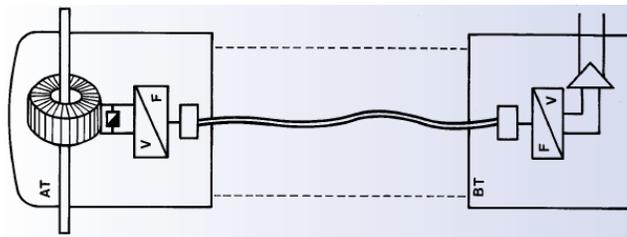
Su característica principal es que están constituidos en gran parte por dispositivos electrónicos (amplificadores operacionales), de donde viene sus nombres transformadores de medida electrónicos (TME).

Es importante distinguir dentro de los TME, los que tienen dispositivos electrónicos en el lado de alta tensión de los de baja tensión. La ventaja de éstos está en la posibilidad de reparar cualquier daño de los componentes electrónicos, sin quitar el voltaje en la línea, pero pierde de importancia a medida que los dispositivos electrónicos son más confiables.

#### 4.1.1. Transformadores de intensidad electrónicos

En la siguiente figura se muestra un transformador de intensidad de baja tensión donde se obtiene una tensión proporcional a la intensidad primaria. Un convertidor de tensión/frecuencia transforma esta señal analógica en digital que pasa a un fotodiodo para su transmisión al lado de baja tensión.

Figura 31. Transformador de intensidad electrónico



Fuente: Electrónica Artech Hermanos S.A. *Introducción a los transformadores de medida.*

p. 35

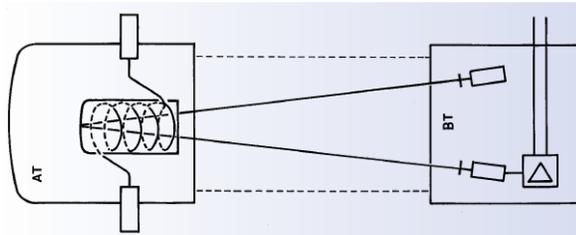
El traslado de la señal del lado de alto voltaje al lado de baja tensión se realiza a través de una fibra óptica, dentro de un medio aislante (normalmente gas).

La señal obtenida en baja tensión, puede aprovecharse directamente si el sistema de protección actuara con señales digitales, pero actualmente es necesario transformar de nuevo en señal analógica mediante convertidores de frecuencia/tensión para luego ser amplificada el cual es uno de los transformadores de intensidad electrónicos, por ejemplo una carga de 10W a  $I_n$  representa 4kW a 20  $I_n$ .

De acuerdo con el efecto Faraday cuando un haz luminoso polarizado atraviesa un campo magnético con una dirección paralela a este, sufre un giro en su plano de polarización, el cual es proporcional a la intensidad de campo

magnético. En la siguiente figura se muestra el principio de un transformador de intensidad electrónico.

Figura 32. **Principio básico transformador de intensidad electrónico**



Fuente: Electrónica Artech Hermanos S.A. *Introducción a los transformadores de medida.*

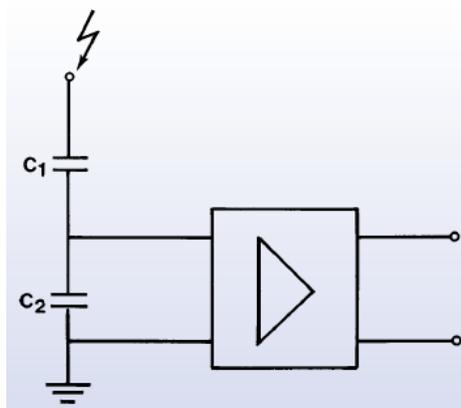
p. 36.

En el lado de alta tensión, hay un cristal sujeto a un campo magnético vertical, proporcional a la corriente primaria. En el lado de baja tensión se emite un haz de luz polarizada, que tras girar su plano de polarización en el cristal, vuelve al lado de baja tensión donde se analiza el desplazamiento de giro del plano. Generalmente los dispositivos electrónicos están en el lado de baja tensión.

#### 4.1.2. Transformadores de tensión electrónicos

Son transformadores de tensión formados por un divisor capacitivo de pequeña capacidad y un amplificador operacional, con lo que se reduce el costo del divisor capacitivo.

Figura 33. **Principio de un transformador de tensión electrónico**



Fuente: Electrónica Artech Hermanos S.A. *Introducción a los transformadores de medida.*

p. 36.

El efecto Faraday se utiliza en ciertos TME de intensidad, pero en el caso de los transformadores de tensión se utilizan los efectos Kerr y Pockels, que son función del campo eléctrico.

De acuerdo con el efecto Kerr, ciertos líquidos (dipolos) isótropos, se vuelven activos ópticamente al ser sometidos a un campo eléctrico, si al pasar una luz polarizada a través de una célula Kerr se puede medir la tensión entre placas de la célula en función de la señal luminosa recibida.

Se denomina efecto Pockels, al cambio del índice de refracción que se origina en los cristales debido al campo eléctrico. Por este efecto, se puede modular en amplitud un haz luminoso que atraviese una célula Pockels en función del voltaje aplicado a esta.<sup>59</sup>

---

<sup>59</sup> Electrónica Artech Hermanos S.A. *Introducción a los transformadores de medida.* p. 37.

## **4.2. Transformadores de medida para subestaciones blindadas**

El transformador de corriente para subestaciones blindadas es un transformador toroidal de baja tensión que se sitúa directamente las terminales aisladas de alta tensión o en la carcasa metálica. En estas circunstancias, la superficie del TI con el conductor de alta tensión debe ser diseñada para que se eviten gradientes elevados.

El TT normalmente está aislado con papel y gas  $SF_6$  a la presión de funcionamiento de la subestación<sup>60</sup>.

## **4.3. Especificaciones de transformadores de instrumento para medida según la normativa del AMM en Guatemala**

Los requisitos específicos para medición del AMM son los siguientes:

La clase de exactitud que el AAM requiere para los transformadores de medición según la norma de coordinación comercial número 14 en su apartado 14.4 serán las siguientes.

- Transformadores de medida: deberá cumplir con las normas IEC 185, 186, 044-1 o ANSI/IEEE C57.13.
- Puntos de conexión: generadores, transportistas, distribuidores, y grandes usuarios en tensiones mayores de 69 kV.

---

<sup>60</sup> Electrónica Artech Hermanos S.A. *Introducción a los transformadores de medida*. p. 37.

Tabla XXXIV. **Clase de precisión PT y CT tensiones mayores a 69 kV**

Voltaje > 69kV	IEC 185/186/044-1		ANSI/IEEE C57.13	
	Clase Exactitud (%)	Carga (burden)	Clase Exactitud (%)	Carga (burden)
PT	0,2	100 VA	0,3	75 VA
CT	0,2	50 VA	0,3	45 A

Fuente: AMM. *Norma de Coordinación Comercial No. 14.* p. 5.

- Puntos de conexión: generadores, transportistas, distribuidores, y grandes usuarios en tensiones iguales o menores a 69 kV.

Tabla XXXV. **Clase de precisión PT y CT tensión igual o menor a 69 kV**

Transformador de Medida	ANSI/IEEE C57.13		ANSI/IEEE C57.13	
	Clase Exactitud (%)	Carga (burden)	Clase Exactitud (%)	Carga (burden)
	Voltaje entre 69 y 13.8 kV		Voltaje 13.8 kV	
PT	0,3	75 VA	0,3	75 VA
CT	0,3	22,5 VA	0,3	12,5 VA

Fuente: AMM. *Norma de Coordinación Comercial No. 14.* p.5.

Además de la clase de precisión el AMM establece que cada punto de medición deberá contar con los correspondientes transformadores de corriente y tensión, con devanados para el uso del sistema de medición comercial independientes de aquellos utilizados para las protecciones.

Asimismo, todo participante del mercado mayorista, que solicite la autorización para el uso de sus equipos de medición deberá presentar al AMM, la siguiente documentación del punto de medición, cumpliendo con las especificaciones de software y de formato que oportunamente indicará el AMM.

- Esquema unifilar y trifilar, conformes a obra.
- Para instalaciones nuevas, protocolos de ensayos de rutina en fábrica de los transformadores de medida, datos de placa de los equipos de acuerdo a la planilla que el administrador del mercado mayorista entregará a todos los participantes del mercado mayorista.
- Cálculo de la corriente primaria prevista para los transformadores de medida, la cual no deberá ser inferior al 50 % de su valor nominal.
- Para transformadores de varias relaciones, enviar el diagrama de conexión de las relaciones disponibles y de la propuesta a utilizar.<sup>61</sup>

---

<sup>61</sup> Administrador de Mercado Mayorista. *Norma de Cordinación comercial No. 14.* p. 5.



## CONCLUSIONES

1. Los transformadores de medida; tanto los de potencial como los de intensidad, son utilizados para monitorear las condiciones de tensión y corriente de la red donde están conectados, para luego ser utilizados los valores reducidos en sistemas de protección y medición, donde se establecen los parámetros de operación que se le quiera dar por parte del usuario.
2. Los transformadores de instrumento, juegan un papel muy importante, dentro de una subestación, ya que desde el punto de vista de protección estos proporcionan las señales de voltaje y corriente a los aparatos de protección (por ejemplo: relés, diferenciales, reconectores, Interruptores de potencia, etcétera). De esta manera actúan al momento de una falla, librando y aislando la falla, protegiendo a los equipos de potencia como lo puede ser el transformador de potencia. Asimismo, en el ámbito de medición estos tienen un papel muy importante para las empresas donde se requiere medir la transferencia de energía, teniendo propósitos comerciales.
3. Las especificaciones para un transformador de potencial o intensidad, se deberán hacer en base a la utilización que se le quiera dar: protección o medición, según las condiciones ambientales y la altura sobre el nivel del mar. Tomando en cuenta bajo qué normativa se quiera utilizar IEC o IEEE, apegándose a los requerimientos mínimos de las normas nacionales, si en dado caso existiera (por ejemplo la Norma de Coordinación Nacional No. 14 del AMM, en el caso de transformadores de medición).

4. Las prácticas de los transportistas al momento de selección se basan, por lo general, a la utilización que se destinará: protección o medición, su voltaje nominal en el sistema y su voltaje máximo. Condiciones ambientales, aspectos constructivos y demás características que el transportista desee bajo la normativa IEC o IEEE cumpliendo con las normas de la Comisión Nacional de Energía Eléctrica y del AMM. Asimismo, tendrá con consideración una evaluación de los certificados de las pruebas que se acuerden entre el fabricante y el transportista, lo cual tendrá lugar en fábrica, cumpliendo con un control de calidad.

## RECOMENDACIONES

1. Al momento de especificar y seleccionar un transformador de instrumento se deberá establecer el campo de utilización, ya sea de protección o medición ya que ambos poseen características distintas, teniendo en consideración las marcas de fabricantes aceptadas por los integrantes del Sistema Eléctrico Nacional, o de la empresa en particular que deseé elija uno de estos equipos.
2. Programar ensayos de mantenimiento, por lo menos, una vez al año para comprobar el estado eléctrico y mecánico de los transformadores de instrumento, o después de que ocurra una falla en el sistema en que se encuentran conectados, para evaluar algún daño posible que pudiera originarse durante la falla.
3. Nunca dejar el devanado secundario de un transformador de corriente abierto, después de haber realizado los ensayos respectivos, por lo que se debe verificar las conexiones antes de energizarlos nuevamente, ya que esto originaría que se quemara el equipo.
4. Asimismo para los transformadores de voltaje, nunca deberán estar en cortocircuito ya que esto dañaría el transformador que llegaría a quemarse, por tanto, después que se haya finalizado las pruebas en campo, deberán verificarse las conexiones antes de conectarlos nuevamente a la red.



## BIBLIOGRAFÍA

1. ABB. *Instrument Transformers Application Guide - Cigre*. [en línea] <[http://www.cigre.nl/media/38693/application\\_guide\\_stroomtransformatoren.pdf](http://www.cigre.nl/media/38693/application_guide_stroomtransformatoren.pdf)>. [Consulta: 10 de octubre de 2015].
2. Administrador de Mercado Mayorista. *Norma de Coordinación Comercial No. 14*. Guatemala. 2013. 37 p.
3. ARGAÑARAZ, José Hugo. *LME1-NC04-Instrumentacion - transformadores de medida*. [en línea] <<http://documents.tips/documents/lme1-nc04-instrumentacion-transformadores-de-medida.html>>. [Consulta: 20 de enero de 2016].
4. Artech. *Manual técnico para transformadores de intensidad*. Hidalgo, México: Transformadores y tecnología, S.A. 2013. 18 p.
5. Artech. *Transformadores de medida combinados .Combined Instrument Transformes*. [en línea]. <<https://www.google.com.gt/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=2&cad=rja&uact=8&ved=0ahUKEwiR3KPUrOjMAhXHJh4KHfPaCNwQFgggMAE&url=http%3A%2F%2Fsistemamid.com%2Fdownload.php%3Fa%3D79260&usg=AFQjCNFQ1kVxQcVhAYZd5QdojO47MiCvRw&sig2=0Q8f2jm97ezWbxlqW3reVw&bv>>. [Consulta: 25 de julio de 2016].

6. Electrónica Artech Hermanos S.A. *Introducción a los transformadores de medida*. Mungia, España: Artech, 2004. 61 p.
7. IEEE Power Engineering Society. *IEEE C57.13 Standard Requirements for Instrument Transformers*. Nueva York, USA : Transformers Committee, 2008. 82 p.
8. International Electrotechnical Commission IEC. *Instrument transformers –Part 1: Current transformers, IEC 60044-1*. GENEVA : IEC Central Office, 2003. ISBN 2-8318-6844-0. 111 p.
9. International Electrotechnical Commission IEC. *Instrument transformers –Part 2: Inductive voltage transformers, IEC 60044-2*. GENEVA : IEC Central Office, 2003. 97 p.
10. OSORIO RIVERA, Wilfrido. *Selección y Especificación de transformadores de Corriente y Potencial en Instalaciones Eléctricas Industriales*. Tesina para optar el grado de especialidad de instalaciones electricas indutriales. UNAM, D.F., México : UNAM, 2014. 73 p.
11. Transformadores de instrumento Modulo ii. *5 transformadores de instrumentos - GAMA FIME*. [en línea] <<http://gama.fime.uanl.mx/~omeza/pro/SE/5.pdf>>. [Consulta: 29 de Marzo de 2016].