



UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA - ELÉCTRICA

EL TRANSFORMADOR DE CORRIENTE ÓPTICO

Selvyn Manolo Rodas Maldonado

Asesorado por: Ing. Norman Scott Gámez Higueros

Guatemala, octubre de 2004.

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FAULTAD DE INGENIERÍA

EL TRANSFORMADOR DE CORRIENTE ÓPTICO

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA

POR

SELVYN MANOLO RODAS MALDONADO

ASESORADO POR ING. NORMAN SCOTT GÁMEZ HIGUEROS

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE
INGENIERO ELECTRICISTA

GUATEMALA, OCTUBRE DE 2004

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Sydney Alexander Samuels Milson
VOCAL I	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
VOCAL II	Ing. Amahán Sánchez Álvarez
VOCAL III	Ing. Julio David Galicia Celada
VOCAL IV	Br. Kenneth Issur Estrada Ruiz
VOCAL V	Br. Elisa Yazminda Vides Leiva
SECRETARIO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Sydney Alexander Samuels Milson
EXAMINADOR	Ing. Erwin Efraín Segura Castellanos
EXAMINADOR	Ing. José Guillermo Bedoya Barrios
EXAMINADOR	Ing. Manuel Fernando Barrera Pérez
SECRETARIO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

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

EL TRANSFORMADOR DE CORRIENTE ÓPTICO

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Mecánica - Eléctrica con fecha 04 de mayo de 2004.

Selvyn Manolo Rodas Maldonado

AGRADECIMIENTOS

- A DIOS:** Jehová, creador del universo, por ser mi guía en todo momento, por hacerme ver que toda sabiduría proviene de Él, por darme fuerza y aliento en los momentos difíciles y por proveerme de una familia que siempre me apoya.
- A MIS PADRES:** Aurelio y Rosalma, por todo el apoyo que me brindaron, por inculcar en mí los principios y valores que todo hombre sabio debe seguir, por la gran confianza que depositaron en mí. Doy gracias a Dios por ustedes.
- A MIS HERMANOS:** Lucky, Yanny e Iván, por alentarme en todo momento para seguir adelante, y por ayudarme a transitar por el camino de la vida en la vía justa.
- A MI FAMILIA:** A mis abuelitos, tíos, primos y sobrinos, con mucho cariño y aprecio.
- A MI ASESOR** Ing. Norman Gámez, por todas sus aportaciones, colaboraciones y tiempo dedicado en el desarrollo de este trabajo de graduación.
- A MIS AMIGOS** A todos mis amigos y compañeros de la universidad, que de alguna u otra forma nos ayudamos para salir adelante. Al ingeniero Mauricio Anzueto, por brindarme su ayuda desinteresada cada vez que lo necesité, y a todas las demás personas que de manea directa o indirecta ayudaron a la culminación de este documento.

DEDICATORIA

A DIOS: Por nunca desampararme.

A MIS Por brindarme su apoyo en todos mis proyectos.

PADRES:

A LAS Tavitch, Chocoalex, Tito, Tibet, Lobo, Masa, Chiquitín, Chicho y
BESTIAS: Coyote, por haberme ayudado en todo momento que lo necesité, y haber hecho más pasajeras las pesadas noches de estudio o de proyectos. Gracias.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	III
GLOSARIO.....	V
RESUMEN.....	IX
OBJETIVOS.....	XI
INTRODUCCIÓN.....	XIII
1. EL TRANSFORMADOR DE CORRIENTE CON DEVANADOS	
1.1 El principio de operación.....	2
1.2 Características técnicas.....	7
1.2.1 Relación de transformación nominal.....	7
1.2.2 El error de relación.....	8
1.2.3 El error de fase.....	8
1.2.4 Exactitud al presentarse sobrecorrientes.....	9
1.2.5 El efecto de la carga en la exactitud.....	11
1.2.6 El efecto de la corriente primaria o secundaria en la exactitud.....	12
1.2.7 Compensación.....	12
1.2.8 Variación de frecuencia.....	13
1.2.9 Forma de onda.....	14
1.2.10 Efecto del conductor de retorno.....	14
1.2.11 Efecto de errores en instrumentos de lectura.....	14
1.2.12 Clasificación estándar de exactitud.....	15
1.2.13 Cargas secundarias.....	19
2. EL TRANSFORMADOR DE CORRIENTE ÓPTICO	
2.1 El efecto Faraday.....	21
2.2 El teorema de Ampere.....	26
2.3 La detección óptica.....	27

2.4	Características técnicas.....	29
2.4.1	Descripción mecánica.....	29
2.4.1.1	Cabeza.....	29
2.4.1.2	Aislador.....	29
2.4.1.3	Base.....	30
2.4.2	Descripción del cable óptico.....	30
2.4.3	Empalmes ópticos.....	31
2.4.4	Descripción de la electrónica.....	31
2.4.5	Descripción del <i>software</i>	33
2.4.5.1	Función mediciones primarias.....	33
2.4.5.2	Función mediciones secundarias.....	34
2.4.5.3	Función controles.....	34
2.4.5.4	Función parámetros.....	36
2.4.6	Características técnicas generales.....	37
2.5	Compatibilidad con equipos actuales.....	39
3.	COMPARACIÓN Y ANÁLISIS DE DIFERENCIAS	
3.1	Diferencias en principios de operación.....	41
3.2	Diferencias en características técnicas.....	42
3.3	Caso práctico.....	48
3.3.1	Análisis de inversión en una subestación nueva.....	56
3.3.2	Análisis de pérdidas	58
3.3.3	Análisis de inversión en una subestación existente	61
	CONCLUSIONES.....	65
	RECOMENDACIÓN.....	67
	BIBLIOGRAFÍA.....	69
	APÉNDICES.....	71

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Diagrama vectorial del transformador de corriente con devanados	2
2.	Conexión al circuito principal	4
3.	Conexión para medir potencia	5
4.	Paralelogramos de exactitud	18
5.	Esquema del experimento de Faraday para observar el giro magnético del plano de polarización.	22
6.	Diagrama de bloques general del transformador de corriente óptico	27
7.	Transformación de la señal	27
8.	Configuración del módulo de comunicación	32
9.	Diagrama sinóptico	39
10.	Transformador de corriente óptico, 245kV	45
11.	Transformador de corriente con devanados, 245kV	46
12.	Diagrama unifilar subestación 230/69kV	49
13.	Línea de 230kV	50
14.	Banco de transformación, lado de 230kV	51
15.	Banco de transformación, lado de 69kV	52
16.	Línea de 69kV	53
17.	Interruptor de amarre 230kV	54
18.	Interruptor de amarre 69kV	54
19.	Área ocupada por la subestación eléctrica	56
20.	Área ocupada por la subestación eléctrica con TCO's	57
21.	Diagrama de flujo de efectivo	62
22.	Diagrama equivalente de flujo de efectivo	63

23. Vista de planta	73
---------------------	----

TABLAS

I. Cargas estandarizadas por USASI / IEEEE	15
II. Clases de exactitud para transformadores de corriente para la medición	16
III. Características del cable de transmisión óptica	30
IV. Mediciones primarias	33
V. Mediciones secundarias	34
VI. Controles	34
VII. Parámetros	36
VIII. Características generales	37
IX. Dimensiones del TCO	45
X. Dimensiones del TCD	46
XI. Resumen de principales diferencias	48
XII. Equipo necesario para la subestación	55
XIII. Características de precisión	60
XIV. Costos iniciales y beneficios finales del TCO	64
XV. Principales libranzas dentro de la subestación	71
XVI. Distancias a lo largo de la subestación	72

GLOSARIO

Armónica corriente	Es la representación de una función periódica como la suma de componentes sinusoidales que tienen diferentes frecuencias. La primera armónica se conoce como la componente fundamental, porque tiene el mismo período de la función "w". Así, la componente sinusoidal de frecuencia $W_n = n \cdot W$ se denomina la n -ésima armónica de la función periódica.
Carga o burden	Impedancia que representa la suma de todas las impedancias de los instrumentos y dispositivos de protección conectados al devanado secundario de un transformador de instrumento.
Corriente rms	Es una medida de su eficacia, es el valor de corriente senoidal que entrega a un resistor de carga la misma potencia promedio que una corriente equivalente de corriente directa.
Digitalización	Conversión de una señal análoga a digital.
Efecto magneto-óptico	Giro magnético del plano de polarización de un haz de luz, debido a la presencia de un campo magnético dentro de un cristal.
Erstedio	Unidad de medida de intensidad de campo magnético.
Factor de potencia	Razón de la potencia real a la potencia aparente.
Impedancia	Razón del voltaje fasorial a la corriente fasorial.

Material ferromagnético	Material cuyos átomos tienen un momento dipolar relativamente grande. Estos momentos se alinean en regiones llamadas dominios. Los momentos de los dominios, sin embargo, varían en dirección, teniendo como resultado la cancelación de los momentos y el material, como un todo, no tiene momento magnético. Pero bajo la influencia de un campo magnético externo, el campo magnético interno aumenta grandemente por encima del campo magnético externo.
Material paramagnético	Material en el cual los átomos tienen un pequeño momento magnético, pero la orientación al azar de los átomos produce en una muestra grande un momento promedio de cero. Bajo la influencia de un campo magnético externo, el campo interno aumenta por encima del externo en una pequeña medida.
Nicol	Prisma de un mineral de estructura laminar muy transparente, que se usa como polarizador y analizador óptico.
Polarizar	Modificar los rayos luminosos por medio de refracción o reflexión, de tal manera que queden incapaces de refractarse o reflejarse de nuevo en ciertas direcciones.
Precesión	Movimiento cónico de rotación alrededor de su eje de simetría, conservando constantemente su orientación.
Reactancia	Componente de la impedancia de un circuito de corriente alterna debido a la existencia de una inductancia o capacitancia.

Sistema de potencia

Son todos los componentes de una red eléctrica, utilizados para la generación, transporte, y distribución de energía eléctrica.

Software

Conjunto de programas que ejecuta una computadora.

RESUMEN

Los objetivos de un transformador de instrumento son el de entregar un valor del parámetro tratado al alcance de los instrumentos de medición, y aislar tanto los instrumentos como al personal que trabaja con ellos, de la alta tensión.

Dentro del presente trabajo se presentan dos tipos de transformadores de corriente que difieren principalmente en el mecanismo utilizado para realizar la transformación del valor de corriente. El primer tipo presentado es el transformador de corriente con devanados que utiliza el mismo principio de operación de un transformador de voltaje, o sea mediante inducción electromagnética de un devanado primario a un devanado secundario en un núcleo de material ferromagnético. El segundo tipo de transformador de corriente presentado, es el que utiliza el efecto magneto-óptico, o sea que utiliza el giro magnético del plano de polarización de un haz de luz para realizar la medición del valor de corriente.

La principal ventaja que presenta el transformador de corriente óptico frente a su similar con devanados es que el primero utiliza un medio para la transformación en el cual no se producen pérdidas de energía, entonces, las mediciones son apegadas totalmente a los valores reales de corriente, caso contrario, el transformador con devanados sufre pérdidas en el núcleo afectando las mediciones tomadas y teniendo como consecuencia la realización de algunos ajustes y aproximaciones para obtener el valor más aproximado a la realidad posible.

Al analizar los costos de un caso práctico de puesta en servicio dentro de una subestación eléctrica, los transformadores ópticos tienen un mayor costo, pero que al final es compensado con el ahorro económico debido al rendimiento del equipo.

OBJETIVOS

➤ **General**

Analizar las ventajas y desventajas de los transformadores de corriente ópticos sobre los transformadores de corriente convencionales.

➤ **Específicos**

1. Analizar las características técnicas del transformador de corriente convencional.
2. Analizar las características técnicas del transformador de corriente óptico.
3. Analizar la compatibilidad de esta nueva tecnología con equipos que se poseen actualmente en Guatemala.
4. Observar las principales diferencias que existen entre el transformador de corriente óptico y el convencional, en lo concerniente a desempeño y características técnicas.
5. Observar las principales diferencias que existen entre el transformador de corriente óptico y el convencional en el equipo para la medición y protección.
6. Analizar en la práctica las ventajas o desventajas globales del transformador de corriente óptico y el transformador de corriente con devanados.

INTRODUCCIÓN

Los transformadores de instrumento en una subestación eléctrica tienen la función estratégica de proveer mediciones exactas y fiables de corriente y voltaje para equipo secundario como medidores, relés de protección, computadoras, y otros equipos disponibles.

La tecnología convencional usada en los transformadores de instrumento desde hace ya más de un siglo, ha tenido muchas mejoras y debido a esto son considerados ahora una de las piezas más fiables dentro de una subestación eléctrica.

Sin embargo, nuevas tecnologías para sensor corriente y voltaje son ahora comercialmente disponibles para satisfacer los nuevos retos que enfrentan las empresas en su afán de brindar un mejor servicio.

Este informe trata sobre los transformadores de corriente, que son un tipo de transformadores de instrumento utilizados para sensor la corriente que pasa a través de una línea de transmisión o de una barra dentro de una subestación eléctrica, con motivos de medición y protección.

Específicamente se presenta una comparación entre una nueva tecnología de transformadores de corriente ópticos y la tecnología actual de los transformadores de corriente con devanados. Se inicia por comprender el funcionamiento del transformador de corriente con devanados, y luego se presenta el funcionamiento y características del transformador óptico.

Una de las principales diferencias entre los dos tipos de transformadores mencionados anteriormente, además del mecanismo para la transformación de la corriente, es el medio utilizado para la misma, pues de éste depende la exactitud de las mediciones y es por esta razón que se motiva la creación de nuevas tecnologías como la que utiliza sensor óptico para realizar la medición.

Dicha tecnología se presenta en este trabajo, siendo el medio para la transformación un cuerpo de cristal transparente sin pérdidas para la propagación de la luz y que no afecta a los campos magnéticos a su alrededor.

Esta característica en el medio de propagación hace que el transformador de corriente óptico sea un instrumento más exacto, preciso y eficiente que el transformador con devanados.

En cuanto a las dimensiones ocupadas por estos transformadores, el transformador de corriente con sensor óptico es más pequeño en comparación con el transformador de devanados, lo cual se traduce en un menor requerimiento de área para su instalación.

Lo anterior representa una reducción en los costos del terreno requerido para el montaje de una subestación eléctrica. Ésta es una reducción en la inversión inicial, pero también hay que considerar el costo del equipo en sí, pues esta nueva tecnología es más cara que su predecesora, entonces, como se observará en la parte final del informe, los ahorros en el costo del terreno se compensan con el mayor precio de los transformadores de corriente ópticos, dejando como balance general una inclinación por los transformadores ópticos debido a las ventajas en el desempeño de los mismos.

1. EL TRANSFORMADOR DE CORRIENTE CON DEVANADOS

Los transformadores de instrumento son partes esenciales en todo sistema de mediciones, y la calidad de éstos afecta directamente la exactitud y desempeño del sistema de potencia completo. Su lugar en el sistema de potencia es el de un sistema auxiliar, es decir un conjunto de elementos básicos que cambian la magnitud, pero no la naturaleza de una cantidad a medir, con el objetivo de realizar una medición más razonable que medir directamente de la línea de alto voltaje.

Así, corrientes primarias son transformadas en magnitud a valores secundarios que son utilizados para alimentar relés, medidores, u otros dispositivos de medición, protección, medición de control, o para realizar facturas de cobro de energía eléctrica. Casi todos estos dispositivos usualmente están diseñados para valores de 5 amperios.

Una segunda pero igual función de los transformadores de instrumento es proveer aislamiento entre el circuito primario y el secundario, logrando simplificar la construcción de los dispositivos de medición, además de dar seguridad al personal que los utiliza.

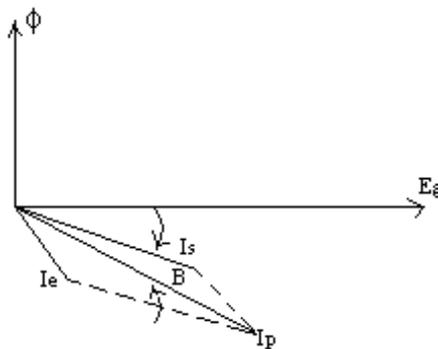
Los transformadores de corriente son diseñados para conectarse en serie con la línea de alta tensión, en la misma forma que un amperímetro. La corriente secundaria tiene una relación establecida con la corriente primaria, consecuentemente, cualquier cambio en la corriente primaria afectará los medidores u otros dispositivos conectados en serie con las terminales secundarias del transformador.

1.1 Principio de operación

En general, la corriente secundaria es inversamente proporcional a la relación de vueltas referida al primario. Como en los transformadores de potencial, la transformación ideal nunca se logra. Pequeños errores están siempre presentes debido a la corriente requerida para magnetizar el núcleo, y para proveer las pérdidas del mismo.

La operación de un transformador de corriente puede ser más sencilla de comprender observando su diagrama vectorial, el cual se presenta en la Figura 1. Esta ilustración es para una relación de transformación de 1:1. La corriente primaria puede ser considerada por dos componentes. Una de éstas es la corriente de excitación que magnetiza el núcleo y provee las pérdidas, la otra componente, como se puede observar en el diagrama, es la corriente secundaria.

Figura 1. Diagrama vectorial del transformador de corriente con devanados



Fuente: General Electric, **Transformadores de instrumento**, Pág. 28.

Donde: E_g = Voltaje inducido secundario I_s = Corriente secundaria
 Φ = Flujo β = Ángulo de fase
 I_e = Corriente de excitación I_p = Corriente primaria

También se puede observar que debido a las diferencias en fase de varias cantidades involucradas, la diferencia en fase entre las corrientes primaria y secundaria será exactamente cero grados únicamente cuando el factor de potencia de la carga total del secundario (esto es, la carga interna del transformador mismo, más la carga externa de medidores, relés, etc.) iguala al factor de potencia de la corriente de excitación.

Para cualquier otra condición, el ángulo diferirá de cero grados por un pequeño ángulo (β), que es llamado ángulo de fase de error del transformador de corriente.

Entonces, podemos decir que el transformador de corriente con devanados, al cual nos estaremos refiriendo de aquí en adelante como "TCD" para mayor simplicidad, es un transformador de medida en el cual la intensidad secundaria es, en las condiciones normales de empleo, prácticamente proporcional a la intensidad primaria y desfasada con relación a ésta un ángulo próximo a cero, para un sentido apropiado de las conexiones.

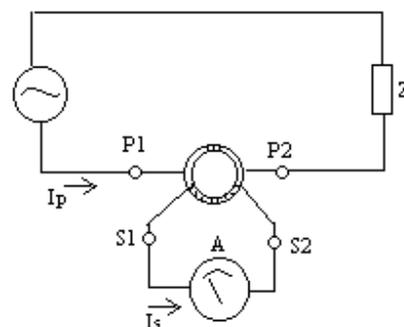
En oposición a lo que ocurre en un transformador de potencial, el transformador de corriente tiene en su devanado primario sólo pocas vueltas, y más generalmente está construido por una barra sólida que atraviesa el mismo. El devanado secundario contiene un gran número de vueltas, lo que da por resultado una impedancia muy alta.

El principio de transformación es el mismo que el de cualquier otro transformador: debido al flujo magnético variante producido por la corriente primaria, se induce un voltaje en el secundario en relación al número de vueltas. Este voltaje, en circuito abierto, puede ser sumamente elevado (hasta miles de voltios). Sin embargo, al cerrar el circuito a través de uno o varios aparatos de medición y/o protección, se establece una corriente máxima que por lo regular es de 5 amperios, que causa una caída de potencial a través de la impedancia interna del transformador, de manera que el voltaje terminal es

muy pequeño. Esto se debe a que la impedancia interna es mucho mayor que la resistencia de los instrumentos.

Su conexión al circuito principal es como sigue:

Figura 2. Conexión al circuito principal

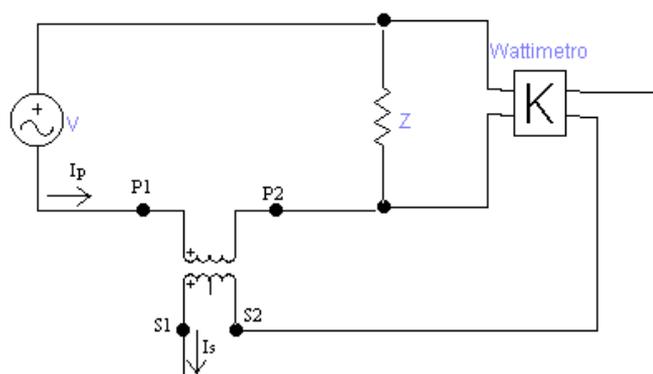


Fuente: www.unlp.com

De la definición y del esquema anterior se deduce que la polaridad no es indiferente, si en un instante la corriente primaria entra por el terminal P1, entonces el terminal por el que fluye la secundaria se denomina S1 (los otros terminales se denominan P2 y S2, respectivamente), debiendo marcarse de forma indeleble y fácilmente legible sobre la superficie del transformador.

El sentido de la conexión es importante, como podría verse de manifiesto si quisiésemos medir la potencia de un sistema:

Figura 3. Conexión para medir potencia



Adaptado de: www.unlp.com

De la figura anterior se puede observar fácilmente que si cambiásemos la S1 por la S2, el vatímetro no mediría la potencia de la instalación, ya que estamos desfasando la intensidad 180° y allí está la importancia de la conexión correcta de los transformadores de corriente.

Como se mencionó al inicio de este capítulo, el TCD tiene principalmente dos funciones y de acuerdo a éstas, es de importancia su comportamiento en el campo de sobrecorrientes, hasta el valor de corriente de cortocircuito, en el punto de la instalación, pues si el núcleo es de medida, y en sus secundarios se conectan dispositivos sensibles a las sobrecorrientes, debe en lo posible limitar la corriente secundaria, cuando se alcanzan valores elevados, para lo cual debe ser entonces saturable.

Cuando la función del equipo es registro de transitorios, que se producen particularmente con corrientes elevadas, los núcleos no deben saturarse para que el registro sea fiel y de igual forma, si el núcleo es de protección, debe estar dimensionado de manera de no limitar la corriente secundaria, es decir, no debe saturarse, debe tener un pequeño error aún con corrientes elevadas.

De lo anterior, observamos que es importante responder a la pregunta de cuál es la función del transformador. Si éste alimenta dispositivos de medición, son muy importantes sus características en estado permanente, en el campo de la corriente nominal.

Si en cambio, el transformador alimenta dispositivos de protección, es importante su comportamiento transitorio, su comportamiento en el rango de sobrecorrientes que se presentan en fallas.

Las normas han fijado el valor de sobrecorriente representativa de estas situaciones en 20 veces la corriente nominal.

En la actualidad, en nuestro país, todavía los transformadores son con núcleo magnético, y tienen características ligadas esencialmente a las características del hierro.

El circuito equivalente del transformador de corriente que se muestra en la Figura 1, es en esencia el mismo que se estudia para el transformador de potencia, pero debe notarse que el transformador de corriente trabaja con inducción variable (con la corriente que por él circula, en otras palabras, la tensión entre bornes es variable).

La precisión del transformador está ligada a la menor corriente derivada por el brazo de excitación, cuando por el aumento de corriente se supera el codo de saturación la precisión cae, y entonces el transformador se satura.

Si se varía la carga aumentándola, esto es más impedancia, se alcanzará la tensión de saturación con menor corriente, y viceversa.

Surgen entonces algunos conceptos muy importantes en la aplicación de los transformadores de corriente. Si estos están destinados a la medición deben estar cargados lo justo; si están menos cargados que el valor para el cual fueron diseñados no saturarán en la forma que se espera, y si están más cargados perderán precisión.

Para un núcleo de protección en cambio, si se carga menos, se extenderá el campo de acción en el que la saturación no se nota.

Las normas definen en consecuencia las características que tienen relación con éstas y otras condiciones de funcionamiento, y en la siguiente sección se presentan estas características.

1.2 Características técnicas

1.2.1 Relación de transformación nominal (Kn)

Es la relación entre la intensidad primaria nominal y la intensidad secundaria nominal.

$$K_n = \frac{I_{pn}}{I_{sn}}$$

1.2.2 Error de relación ("e")

Es el error que el transformador introduce en la medida de una intensidad y que proviene del hecho de que la relación de transformación real no es igual a la relación de transformación nominal:

$$\varepsilon(\%) = \frac{K_n \cdot I_s - I_p}{I_p} 100$$

I_p : Intensidad primaria real

I_s : Intensidad secundaria real

1.2.3 Error de fase o de ángulo (" β ")

Se puede definir como la diferencia de fase o de ángulo entre los vectores de las intensidades primaria y secundaria, con el sentido de los vectores elegidos de forma que este ángulo sea cero para un transformador perfecto. Esta diferencia se suele expresar en minutos y se puede observar fácilmente en la Figura 1 como el ángulo β .

La causa de que I_s no sea una reproducción perfecta de I_p es, única y exclusivamente, la corriente I_o ; por tanto, para reducir los errores (de relación y de ángulo), habrá que reducir dicha corriente de excitación.

1.2.4 Exactitud al presentarse sobrecorrientes

Los TCD tienen clasificaciones de exactitud al presentarse una sobrecorriente. Una clasificación dada por la USASI Standards for Instrument Transformers que concuerda exactamente con la norma IEEE Std C57.13-1993, la cual se basa en el voltaje que aparece en las terminales del devanado secundario sin exceder una relación estándar de error. Veamos, por ejemplo, un transformador cuya clasificación sea:

2.5 (H ó L) 200

ó 10 (H ó L) 200

El primer término establece el máximo error porcentual en la relación de transformación, el segundo término (H ó L) es determinado por algunas características que se explicarán más adelante, y el tercer término es el voltaje secundario que puede ser entregado a 20 veces la corriente nominal secundaria sin exceder el error en la relación de transformación.

Los errores máximos en relación de transformación estándar son 2.5 % y 10%. Las clases de voltajes secundarios son: 10, 20, 50, 100, 200, 400, y 800 voltios.

Para una corriente secundaria normal de 5 amperios, 20 veces la corriente secundaria nominal es 100 amperios, de aquí, el voltaje secundario nominal dividido entre 100 amperios da como resultado la carga secundaria en ohms. En el caso del primer ejemplo, 2.5 (H ó L) 200, este transformador puede tener una carga de 2 ohmios sin exceder el 2.5 por ciento de error de transformación en el rango de 5 amperios secundarios a 100 amperios secundarios. De la misma manera, en el segundo caso, 10 (H ó L) 200, el error de transformación de corriente nominal a 20 veces dicha corriente no debe exceder el 10%.

Debido a los pasos en la clasificación, las clases estándar no representan a cabalidad las curvas de comportamiento de los transformadores al presentarse una sobrecorriente. Ellas proveen una interpretación conveniente del comportamiento de los transformadores bajo estas circunstancias. Debe ser reconocido que las clasificaciones especifican únicamente el voltaje secundario mínimo, al cual la relación de transformación especificada no será excedida.

Así, la clasificación, 10 (H ó L) 200, significa que, a 200 voltios, el error de transformación no es mayor al 10%. Por inferencia, esto también significa que el error de transformación, al voltaje que corresponde al siguiente nivel de voltaje (400), es mayor al 10%, lo que significa que la clasificación debería ser 10 (H ó L) 400.

Mientras la clasificación de comportamiento en sobrecorriente esta basada principalmente en el error de transformación a 20 veces la corriente secundaria, es también deseable poder conocer el comportamiento del transformador a valores bajos de corriente. Dependiendo de este comportamiento, los transformadores de corriente pueden ser ampliamente divididos en dos clases. La primera clase, designada por la letra “H”, tendrá un constante porcentaje de error de transformación cuando la corriente secundaria varía ampliamente en magnitud. La otra clasificación, designada por la letra “L”, tendrá una constante magnitud de error de transformación (y de ahí un porcentaje de error variable) bajo condiciones similares.

Más precisamente, la USASI Standards for Instrument Transformers define un transformador clase “H” como un transformador capaz de entregar en sus terminales secundarias un voltaje igual al voltaje especificado en su clase a cualquier corriente secundaria comprendida entre 5 a 20 veces su corriente nominal secundaria, sin exceder el error de transformación especificado.

En otras palabras, un transformador clasificado como 10H200 tendrá un error de relación que no excede el 10% con una carga de 2 ohmios mientras opera a cualquier corriente secundaria entre su valor nominal y 20 veces el valor nominal.

El 10% del error de transformación o error de relación no debe excederse incluso con una carga de 4 ohmios y con una corriente secundaria entre 1 y 10 veces su valor nominal, o con una carga de 8 ohmios entre 1 y 5 veces la corriente secundaria nominal.

Un transformador clase “L” no puede ser usado con cargas mayores a corrientes secundarias menores sin exceder su clasificación en el error de transformación.

1.2.5 Efecto de la carga en la exactitud

Como se ilustró en la Figura 1, los errores en la corriente del transformador se hacen presentes debido a que parte de la corriente primaria es requerida para magnetizar el núcleo y suplir las pérdidas del mismo, así, esta parte de la corriente no está disponible para contribuir a la corriente secundaria.

El valor de esta corriente de excitación (I_e), Fig. 1, depende de la cantidad de flujo que esta debe producir. La cantidad de flujo depende, al contrario, del voltaje secundario (E_g) que es requerido para forzar a la corriente secundaria (I_s) a circular por la impedancia de la carga secundaria, cuyo valor comprende el valor de la impedancia del devanado secundario del transformador y la impedancia de la carga conectada al secundario del transformador incluyendo los cables para su conexión.

Así, para una corriente secundaria específica de un transformador en particular, la corriente de excitación (y en consecuencia los errores) se incrementará en proporción directa a la impedancia secundaria, o a los volt-amperes que represente la misma (obviando el efecto del factor de potencia de la carga).

El factor de potencia de la carga afectará también los errores. De hecho, si el factor de potencia se incrementa, la corriente secundaria estará más cerca en fase con el voltaje E_g , así el error en el ángulo de fase (β) se incrementa, pero el error de transformación decrece conforme I_p se aproxime a I_s . Al contrario, disminuyendo el factor de potencia de la carga, se incrementa el error en el ángulo de fase, o incluso se vuelve negativo, pero esto incrementará el error de relación. El máximo error de transformación ocurrirá cuando I_s este en fase con I_e , después de este punto el error de transformación decrecerá.

1.2.6 Efecto de la corriente primaria o secundaria en la exactitud

Como ha sido señalado previamente, el valor de la corriente de excitación (I_e), Fig. 1, depende del voltaje secundario (E_g) que es requerido para hacer circular la corriente

secundaria (I_s) a través de la impedancia secundaria total. A medida que la corriente primaria decrece de su valor nominal para un transformador específico con una carga constante, la corriente secundaria decrecerá aproximadamente en la misma relación, y la corriente de excitación también decrecerá.

Así como la corriente de los transformadores está diseñada normalmente para operar con una densidad de flujo bajo en el núcleo, bajo el punto de máxima permeabilidad efectiva, la corriente de excitación no decrecerá tan rápido como la corriente secundaria.

Y debido a que los errores dependen de la relación de la corriente de excitación a la corriente secundaria, estos errores se incrementarán con la corriente primaria, y así, la corriente secundaria disminuye.

1.2.7 Compensación

La característica general de un transformador de corriente es que la corriente secundaria multiplicada por la relación de vueltas dará como resultado una cantidad menor a la corriente primaria, debido a la cantidad de pérdidas en el núcleo. Estas pérdidas son dependientes de dos características, de la carga y del valor de la corriente secundaria.

El transformador puede ser compensado para dar un error de transformación de cero bajo algún valor particular de corriente y de carga, esto es posible haciendo un poco más grande la relación de vueltas que la relación nominal, así, la corriente secundaria aumentará la cantidad necesaria para dicha compensación.

Esta compensación es usualmente lograda reduciendo el número de vueltas del devanado secundario y esto se conoce como “compensación de vueltas”. El cambio introducido de esta manera es una cantidad pequeña pero innegable.

1.2.8 Variación de frecuencia

Transformadores de corriente pueden ser usados en un relativamente ancho rango de frecuencias sin un apreciable cambio en su desempeño. En general, los errores se incrementan al disminuir la frecuencia, y la reactancia y el calentamiento del transformador se incrementan con la frecuencia. Por esta razón, los límites de frecuencia indicados para cada diseño de transformador de corriente deben ser seguidos.

Debido a que los errores se incrementan con la disminución de la frecuencia, la mayor parte de los transformadores de corriente tienen una clasificación de exactitud separada para varios valores de frecuencia estándar.

Por ejemplo, un transformador diseñado primariamente para operar a 60 Hz puede tener una exactitud diferente a una frecuencia de 25, 50, ó 400 Hz, lo cual debe ser considerado al poner en operación el transformador de instrumento.

1.2.9 Forma de onda

Las ondas que componen la corriente del transformador contienen terceros armónicos, teniendo estos una magnitud de cuando mucho el 50 por ciento de la componente fundamental, entonces se reproducirá en el secundario del transformador una forma de onda con una muy pequeña distorsión, y los errores serán incrementados en una cantidad muy pequeña, generalmente menor al 0.1%.

Ondas que contienen armónicos de mayor frecuencia pueden no ser reproducidas tan exactamente, debido a que la cantidad de distorsión aumenta cuando la frecuencia y magnitud de los armónicos se incrementa. Así, armónicos más altos son usualmente de magnitudes muy bajas, y en esta instancia, causarán un error pequeño.

1.2.10 Efecto del conductor de retorno

Conductores que llevan grandes corrientes, como los que pueden ser usados para conductores de retorno en transformadores de corriente de 2000 amperios nominales y más, producen un relativamente grande campo magnético a su alrededor. Si dichos conductores son colocados a una distancia muy corta del núcleo del transformador de corriente, este flujo puede concentrarse en el núcleo, causando su saturación y, consecuentemente, errores mayores.

1.2.11 Efecto de errores en instrumentos de lectura

Cuando transformadores de corriente van a ser utilizados únicamente en la medición de corriente, solamente el error de transformación debe ser considerado. Pero cuando se necesita medir potencia u otros patrones como la relación de fase entre corriente y voltaje, el error en el ángulo de fase del transformador debe ser considerado. Esto es necesario debido a que un error en el ángulo de fase de la corriente constituye un adelanto en fase entre la posición del vector de la corriente primaria y el vector de corriente secundaria.

El resultado general es un cambio en la relación de fase de la corriente y voltaje en el circuito secundario, comparado con esta misma relación en el circuito primario, lo cual introduce un error en la medición. Así, ambos errores, el de transformación y de ángulo de fase en transformadores de corriente, son normalmente tan pequeños que pueden ser despreciados en casi todos los instrumentos de medición.

1.2.12 Clasificación estándar de exactitud

La USASI Standards for Instrument Transformer, USAS C57.13 que concuerda con la norma IEEE C57.13-1993, ha estandarizado un método de clasificación de la exactitud de los transformadores de corriente. Como la exactitud es dependiente de la carga, cargas estándar han sido también designadas. Estas son cargas a las cuales la exactitud va a ser clasificada.

Las cargas estándar han sido escogidas para cubrir el rango normalmente encontrado en operación y están listadas en la Tabla I.

Tabla I. Cargas estandarizadas por USASI/ IEEE

Designación	Características		Carga secundaria a 60 Hz y 5 amperios de corriente secundaria		
	Resistencia Ohms	Inductancia Milihenrios	Impedancia Ohms	Volt- Amperios	Factor de potencia
B-0.1	0.09	0.116	0.1	2.5	0.9
B-0.2	0.18	0.232	0.2	5.0	0.9
B-0.5	0.45	0.580	0.5	12.5	0.9
B-1	0.5	2.3	1.0	25.0	0.5
B-2	1.0	4.6	2.0	50.0	0.5
B-4	2.0	9.2	4.0	100.0	0.5
B-8	4.0	18.4	8.0	200.0	0.5

Las clasificaciones en exactitud para transformadores de corriente para la medición proporcionadas por USASI/ IEEE, están listadas en la Tabla II.

Tabla II. Clases de exactitud para transformadores de corriente para la medición

Clase	Límites para los factores de error de relación y factor de error de transformador				Límite para factor de potencia
	100% de corriente nominal		10% de corriente nominal		
	Min	Max	Min	Max	
1.2	0.988	1.012	0.976	1.024	0.6-1.0
0.6	0.994	1.006	0.988	1.012	0.6-1.0
0.3	0.997	1.003	0.994	1.006	0.6-1.0

El factor de corrección de relación (RCF, por sus siglas en inglés), ha sido definido como el factor por el cual la relación nominal debe ser multiplicada para poder obtener la relación real.

El factor de corrección de transformador (TCF, por sus siglas en inglés), toma en cuenta el efecto combinado del error de relación de transformación y el error en el ángulo de fase. Está definido como el factor por el cual la lectura del watímetro debe ser multiplicada para corregir el efecto del error en la transformación y en el ángulo de fase.

Los límites del TCF, indicados en la Tabla 2, han sido establecidos por USASI/IEEE con el requerimiento de que el factor de potencia de la carga debe estar dentro de los límites establecidos también en dicha tabla. Si el factor de potencia del circuito primario está fuera de este rango, el TCF del transformador puede también salir del rango especificado.

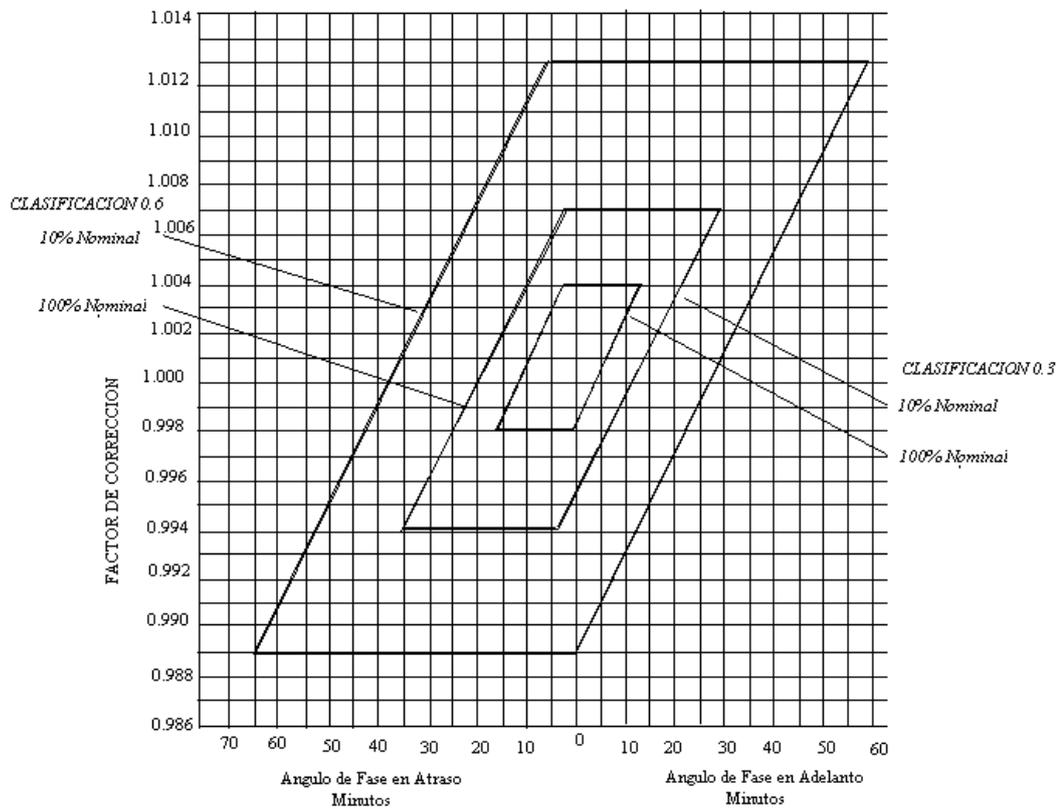
Para cualquier factor de corrección de relación de un transformador de corriente específico a una corriente dada, los valores positivos y negativos del error en el ángulo de fase (β) en minutos pueden ser adecuadamente expresados como sigue:

$$\beta = 2600 (\text{RCF} - \text{TCF})$$

El TCF es tomado al contrario como el máximo y mínimo del valor especificado en la tabla, y el RCF es el factor que el transformador tendrá bajo las condiciones a las cuales se va a chequear.

Esta relación es graficada para varias cargas en la Figura 4.

Figura 4. Paralelogramos que representan la exactitud de transformadores de corriente clases 0.3 y 0.6



Fuente: General Electric, **Transformadores de instrumento**, Pág. 28.

Tomando como base el sistema dado por la USASI/ IEEE, la exactitud de un transformador de corriente puede ser descrita por la mejor exactitud que presenta a cada valor de carga. Así, un transformador de corriente con devanados puede ser catalogado como:

0.3 B-0.1; 0.3 B-0.2; 0.3 B-0.5; y 0.3 B-2

Para otro transformador, el error puede ser tal que solo se pueda clasificar como:

0.3 B-0.1; 0.3 B-0.2; 0.6 B-0.5 y 1.2 B-2; o incluso:

0.6 B-0.1; 0.6 B-0.2 y 1.2 B-0.5

En el tercer ejemplo, la omisión de cualquier referencia de exactitud a B-2 indica que el error es más grande que aquel especificado por la clase de exactitud más baja a esta carga; de aquí ninguna especificación puede ser dada para tal caso.

1.2.13 Cargas secundarias

Como previamente se estableció, la carga en el circuito secundario afecta la exactitud del dispositivo. Para predecir el comportamiento de un transformador en particular utilizado en cierto circuito, la carga de todos los medidores, instrumentos y relés en su secundario, debe de ser conocida.

Es a menudo deseable conectar varios medidores o combinaciones de dispositivos en serie al secundario del transformador de corriente. En estas situaciones, es necesario totalizar la carga de todos estos dispositivos.

Por varios propósitos, es suficientemente exacto únicamente sumar aritméticamente las impedancias individuales de los dispositivos involucrados.

En el caso de que se conozca la carga en volt-amperios, la impedancia de dicha carga se puede calcular al despejarla de la siguiente relación:

$$P_C(VA) = Z_C I_{sn}^2$$

donde I_{sn} es la corriente que circula a través de la carga, y Z_C es la impedancia de la carga.

2. EL TRANSFORMADOR DE CORRIENTE ÓPTICO

El **TCO** (Transformador de Corriente con sensor Óptico) es un dispositivo capaz de medir la corriente que pasa a través de una línea de alto voltaje, tanto para fines de medición como para protección.

La tecnología que utiliza el transformador de corriente óptico se basa en dos propiedades físicas:

- El efecto Faraday, o efecto magneto-óptico, que se da en medios ópticos transparentes tales como vidrio o cristal, y
- El teorema de Ampere, derivado de la teoría electromagnética.

Antes de explicar el funcionamiento del TCO se dará una breve explicación de las dos propiedades físicas mencionadas anteriormente.

2.1 El efecto Faraday

El efecto Faraday es un efecto magneto-óptico que describe la influencia de un campo magnético en un medio óptico transparente, lo cual se conoce en óptica como el giro magnético del plano de polarización. Las sustancias que por su naturaleza no tienen la propiedad de hacer girar el plano de polarización la adquieren cuando están sometidas a la acción de un campo magnético exterior.

El fenómeno de giro magnético del plano de polarización fue descubierto en el año 1846 por Faraday. Este descubrimiento fue resultado de los laboriosos intentos de Faraday para descubrir la relación entre los fenómenos luminosos y magnéticos.

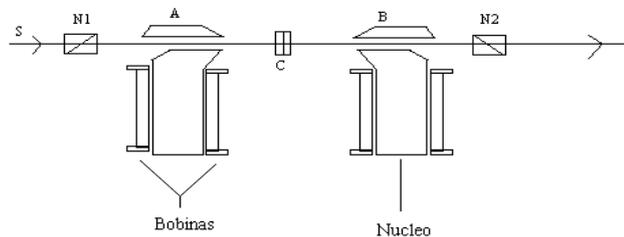
Faraday supuso que había conseguido hallar la influencia directa del campo magnético sobre la luz y escribió sobre esto: "He conseguido magnetizar y electrizar un rayo de luz e iluminar una línea de fuerza magnética". Pero, en realidad, el fenómeno descubierto por Faraday tiene un carácter diferente: el campo magnético influye sobre la sustancia sometida a él, y esta última es la que varía el carácter de la propagación de la luz.

El giro magnético del plano de polarización se produce cuando la luz se propaga en una sustancia transparente a lo largo de las líneas de fuerza magnéticas. Por esto, lo más

cómodo para observar el giro magnético es taladrar unos canales estrechos en los extremos de un electroimán.

El esquema de este experimento se muestra en la Figura 5, donde S es un foco luminoso, A y B son los extremos del electroimán, N1 y N2 son dos nicoles y C el cuerpo en que tiene lugar el giro del plano de polarización. Mientras no existe campo magnético (es decir, cuando se desconecta la corriente que pasa por el electroimán), si los nicoles N1 y N2 están cruzados, la luz no pasa a través de todo el sistema. Pero al conectar la corriente y producirse entre los polos del electroimán el campo magnético, el plano de polarización de la luz que pasa por el cuerpo transparente C gira y ésta es transmitida por el nicol N2.

Figura 5. Esquema del experimento para observar el giro magnético del plano de polarización



Fuente: S. Frish y A. Timoreva. **Curso de física general.** Pág. 239.

El ángulo de giro φ del plano de polarización es proporcional a la longitud l del camino recorrido por la luz a través de la sustancia sometida al campo magnético y a la intensidad de este campo H , como se ve a continuación:

$$\varphi = k l H$$

donde el coeficiente k caracteriza el poder que para hacer girar el plano de polarización tiene el cuerpo dado cuando se encuentra sometido a la acción del campo magnético.

Los valores de k , en general, no son grandes. Tanto los cuerpos sólidos transparentes como los líquidos y los gases presentan la propiedad de hacer girar el plano de

polarización cuando se encuentran en un campo magnético. Para algunas clases de vidrio (flint pesado) k llega a tener un valor 0.1, si el ángulo ϕ se mide en minutos, H en erstedios y l en centímetros.

Cuando en un campo magnético se introducen cuerpos que ya de por sí son ópticamente activos, a su propiedad natural de hacer girar el plano de polarización se suma la que produce el campo magnético.

Giros bastante grandes se observan en capas muy delgadas (tan delgadas que son transparentes) de metales ferromagnéticos, como el hierro, níquel y cobalto. Una película de hierro de 0.1μ de espesor situada en un campo cuya intensidad sea de 10,000 Oe hace que el plano de polarización gire 2° . El ángulo de giro que producen los cuerpos ferromagnéticos es proporcional al grado de magnetización de la sustancia ferromagnética, y por esto no se cumple la correlación presentada anteriormente.

No todos los cuerpos sometidos a la acción de un campo magnético hacen que el plano de polarización gire en el mismo sentido. Se llaman dextrógiros o positivos aquellos cuerpos que hacen que el plano de polarización gire hacia la derecha del observador que mira a lo largo del campo magnético.

En otras palabras, si la dirección de las líneas de fuerza magnéticas se compara con el movimiento de avance de un sacacorchos, la dirección de giro de su cabeza indica la dirección en que hacen girar el plano de polarización los cuerpos positivos. El coeficiente k de estos cuerpos se considera positivo.

Los cuerpos que hacen girar el plano de polarización en dirección inversa a la indicada anteriormente se llaman levógiros o negativos. Éstos tienen siempre en su composición átomos paramagnéticos. Pero las sustancias paramagnéticas no son siempre negativas. La dirección de giro que produce cada sustancia depende únicamente de la dirección del campo magnético y no de la dirección en que se propaga la luz.

El giro magnético se diferencia en esto del giro natural, puesto que para este último la dirección de giro depende de cómo se hace la observación, en el sentido que sigue el haz luminoso o en sentido contrario. Entonces, debido a esto, el plano de polarización de los rayos de luz que pasan dos veces (una en un sentido y otra en el opuesto) a través de un cuerpo, que produce el giro natural, no experimenta ninguna rotación. Pero cuando el giro es magnético, si el rayo pasa el cuerpo dos veces (una en un sentido y otra en el opuesto), el ángulo de giro aumenta.

Esta circunstancia da la posibilidad de aumentar el ángulo de giro del plano de polarización haciendo que la luz se refleje varias veces dentro del cuerpo sometido a la acción del campo magnético. Para esto, entre los polos de un electroimán se coloca el cuerpo que se va a analizar, el cual tiene la forma de paralelepípedo con las caras opuestas plateadas, a excepción de dos franjas estrechas en sus extremos contrarios.

El rayo de luz pasa a través del cuerpo varias veces, hacia delante y hacia atrás, reflejándose en las superficies plateadas, y, de acuerdo con lo dicho anteriormente, el ángulo de giro de su plano de polarización $\Delta\phi$ aumenta proporcionalmente a la longitud del camino que recorre dentro del cuerpo.

La magnitud del giro magnético depende de la longitud de onda, por esto, para una misma sustancia, el coeficiente k tiene valores algo diferentes para distintas longitudes de onda.

El fenómeno del giro magnético del plano de polarización se debe a la precesión que experimentan los electrones que entran en la composición de los átomos o las moléculas, cuando existe un campo magnético externo. Como resultado de esta precesión en el cuerpo, adquieren valores diferentes los índices de refracción de los rayos polarizados circularmente en el sentido de las agujas del reloj y en el inverso. Por esta razón, la

velocidad de propagación de los rayos polarizados circularmente en sentidos distintos resulta distinta. Esta última circunstancia conduce al giro del plano de polarización.

El tiempo necesario para que se produzca el giro del plano de polarización, una vez conectado el campo magnético, es muy pequeño, lo mismo que el que se precisa para que desaparezca después de desconectar dicho campo, este tiempo es del orden de los nanosegundos.

En otras palabras, se podría decir que el campo magnético altera el curso normal de los electrones que componen el medio, los cuales adquieren un patrón circular y afecta la polarización de un haz de luz monocromática propagándose en la misma dirección que el campo magnético.

2.2 El teorema de Ampere

La ley integral de Maxwell que se presenta a continuación, con frecuencia se conoce como la ley circuital de Ampere para el espacio vacío.

$$\oint_C \mathbf{B} \cdot d\mathbf{s} = \mu_0 \int_S \mathbf{j} \cdot d\mathbf{s}$$

Los significados de las magnitudes del campo expresadas en la ecuación anterior, son relativas a cualquier línea cerrada l que limita una superficie S . La dirección positiva del elemento ds puede tomarse a cualquier lado de S , pero el sentido de integración positiva alrededor de l debe de concordar con la regla de la mano derecha con respecto a ds .

La relación dada por la ecuación tratada, significa que la integral de línea del campo \mathbf{B} alrededor de cualquier trayectoria cerrada arbitraria l en todo instante t , debe de ser