

**Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas**

**Facultad de Ingeniería Eléctrica**

**Departamento de Electroenergética**



## **TRABAJO DE DIPLOMA**

### **Procedimiento de Diseño de Transformadores de Intensidad de Baja Tensión con Núcleo Toroidal**

**Autor: Jorge Coca Sacerio**

**Tutores: Ing Yosvany Paz Coro**

**MSc. Leonardo Rodríguez Jiménez**

**MSc. Agustín González**

**Santa Clara**

**2017**

**"Año 59 de la Revolución "**

**Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas**

**Facultad de Ingeniería Eléctrica**

**Departamento de Electroenergética**



## **TRABAJO DE DIPLOMA**

### **Procedimiento de Diseño de Transformadores de Intensidad de Baja Tensión con Núcleo Toroidal**

**Autor: Jorge Coca Sacerio**

**e-mail: [jcoca@uclv.cu](mailto:jcoca@uclv.cu)**

**Tutor: Ing Yosvany Paz Coro**

**MSc. Leonardo Rodríguez Jiménez**

**e-mail: [leonardo@uclv.edu.cu](mailto:leonardo@uclv.edu.cu)**

**MSc. Agustín González**

**e-mail: [agustingd@uclv.cu](mailto:agustingd@uclv.cu)**

**Santa Clara**

**2017**

**"Año 59 de la Revolución "**



Hago constar que el presente trabajo de diploma fue realizado en la Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas como parte de la culminación de estudios de la especialidad de Ingeniería Eléctrica, autorizando a que el mismo sea utilizado por la Institución, para los fines que estime conveniente, tanto de forma parcial como total y que además no podrá ser presentado en eventos, ni publicados sin autorización de la Universidad.

---

Firma del Autor

Los abajo firmantes certificamos que el presente trabajo ha sido realizado según acuerdo de la dirección de nuestro centro y el mismo cumple con los requisitos que debe tener un trabajo de esta envergadura referido a la temática señalada.

---

Firma del Autor

---

Firma del Jefe de Departamento  
donde se defiende el trabajo

---

Firma del Responsable de  
Información Científico-Técnica

## **PENSAMIENTO**

*Nunca hay que pactar con el error, aún cuando aparezca sostenido por textos sagrados.*

*Mahatma Gandhi*

## DEDICATORIA

A mi madre, por su amor sincero, por cuidarme y por estar siempre dispuesta a brindarme lo mejor de sí.

A mi padre, por sus consejos, por enseñarme y guiarme por el buen camino convirtiéndome en el hombre que hoy soy.

A mi hermana, por sus cariños y por siempre hacer que me sienta bien a su lado, ejemplo a seguir para mí.

A mis tíos que durante estos 5 años siempre estuvieron ahí para lo que me hiciera falta.

A todos va dirigido este trabajo, los amo.

## **AGRADECIMIENTOS**

Mediante estas líneas aprovecho para agradecer a mi familia por apoyarme incondicionalmente en todo lo referente a la universidad, a mis tutores por colaborar a tiempo completo para el desarrollo de este trabajo, a mis compañeros de cuarto, a mis amigos por estar siempre ahí, a todos les doy gracias.

## TAREA TÉCNICA

1. Análisis de los referentes teóricos asociados a los transformadores de intensidad, teniendo en cuenta: características constructivas, principio de funcionamiento, tipos según su aplicación y diseño, parámetros de diseño, clase de exactitud, valores nominales y requisitos de diseño según las normas vigentes de la IEC o UNE.
2. Elaboración de un procedimiento para el diseño y recalcado de los transformadores de intensidad de baja tensión con núcleo toroidal.
3. Evaluación de los resultados de la aplicación de este procedimiento mediante la comparación de los resultados del mismo con un diseño dado por un fabricante.

---

Firma del Autor

---

Firma del Tutor

## RESUMEN

En este trabajo de investigación se abordan los referentes a teóricos acerca de los transformadores de instrumentación, en particular, los transformadores de intensidad. En el mismo se analizaron sus características principales como son: elementos constructivos, principio de funcionamiento, tipos que existen según su aplicación y diseño y algunos parámetros que definen su clase de exactitud, valores nominales y requisitos de diseño según las normas de la IEC o UNE.

Finalmente, se implementó un procedimiento de diseño, que puede ser utilizado también para el recalcado, de transformadores de intensidad de baja tensión con núcleo toroidal comparando los resultados obtenidos con un diseño ofrecido por el fabricante.

## ÍNDICE

PENSAMIENTO .....	i
DEDICATORIA .....	ii
AGRADECIMIENTOS .....	iii
TAREA TÉCNICA.....	iv
RESUMEN .....	v
ÍNDICE.....	vi
INTRODUCCIÓN .....	1
CAPÍTULO 1. REFERENTES TEÓRICOS ACERCA DE LOS TRANSFORMADORES DE MEDICIÓN 4	
1.1 Importancia de los transformadores de instrumentación .....	4
1.2 Definición de los transformadores de intensidad .....	5
1.3 Tipos de transformadores de corriente según su construcción.....	7
1.4 Condiciones de operación del transformador de corriente .....	7
1.4.1 Condiciones de operación normal.....	7
1.4.2 Condición de operación anormal .....	8
1.5 Transformador de intensidad de baja tensión con núcleo toroidal .....	8
1.5.1 Características constructivas.....	8
1.5.2 Principio de funcionamiento.....	9
1.5.3 Tipos según su aplicación y diseño.....	11

1.5.4	Parámetros de diseño que influyen y definen su clase de exactitud .....	12
1.6	Identificación de valores nominales y requisitos de diseño según las normas vigentes de la IEC o UNE .....	14
1.7	Consideraciones finales del capítulo.....	16
<b>CAPÍTULO 2. PROCEDIMIENTO PARA EL DISEÑO DE TRANSFORMADORE DE INTENSIDAD DE BAJA TENSIÓN CON NÚCLEO TOROIDAL.....</b>		<b>17</b>
2.1	Descripción del procedimiento .....	17
2.2	Modelo matemático para el diseño del transformador de intensidad.....	18
2.2.1	Diseño del núcleo.....	18
2.2.2	Cálculo de los parámetros del núcleo .....	19
2.2.3	Número de vueltas del devanado secundario.....	21
2.2.4	Intensidad del primario .....	22
2.2.5	Sección del devanado secundario .....	22
2.2.6	Diámetro desnudo del devanado secundario .....	22
2.2.7	Área teórica de la ventana del primario y el secundario.....	23
2.2.8	Área disponible para los bobinados .....	24
2.2.9	Resistencia del devanado secundario.....	24
2.2.10	Número de capas del devanado secundario .....	25
2.2.11	Errores de relación y de fase.....	25
2.2.12	Impedancia de la carga .....	26
2.2.13	Impedancia del secundario.....	27
2.2.14	Tensión inducida en el secundario bajo condiciones de carga .....	28
2.2.15	Densidad de flujo en el núcleo.....	28
2.2.16	Intensidad del campo magnético ( $H$ ).....	28
2.2.17	Corriente de magnetización y corriente debida a las pérdidas magnéticas.....	29

2.2.18 Cálculo de la corriente en vacío.....	30
2.2.19 Cálculo del ángulo entre la corriente en vacío ( $I_o$ ) y la corriente debida a las pérdidas magnéticas ( $I_a$ ).....	30
2.2.20 Cálculo del ángulo $\psi_s$ comprendido entre la tensión inducida ( $E_2$ ) y la corriente por secundario ( $I_s$ ) .....	30
2.3 Parámetros que influyen en los errores de relación y de fase .....	31
2.4 Pasos a seguir para el recálculo de un transformador de intensidad de baja tensión con núcleo toroidal.....	32
2.5 Pasos a seguir para el diseño de un transformador de intensidad de baja tensión con núcleo toroidal.....	35
2.6 Recálculo de un transformador de intensidad desde un núcleo ya diseñado .....	36
2.7 Consideraciones finales del capítulo.....	47
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	48
Conclusiones .....	48
Recomendaciones .....	48
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	49

## INTRODUCCIÓN

En la actualidad resulta una paradoja construir instrumentos para medir energía en circuitos de alto voltaje y corriente. En este caso, para brindarle un adecuado aislamiento y capacidad de corriente tendrían que ser enormes por lo que, tales instrumentos serían costosos, difíciles de construir y expondrían a los técnicos a peligros de altos voltajes. Son éstas las principales razones para la utilización de los transformadores de instrumentación. Dichos transformadores pueden clasificarse en: transformadores de intensidad y transformadores de tensión.

Los transformadores de instrumentación son dispositivos que entregan exactamente fracciones de las corrientes y voltajes.

La aplicación adecuada de los transformadores de corriente y de potencial implica la consideración de varios requisitos, como son: construcción mecánica, tipo de aislamiento (seco o líquido), relación de transformación en función de las corrientes o tensiones primarias y secundarias, régimen térmico continuo, regímenes de tiempo corto térmico y mecánico, clase de aislamiento, nivel de impulso, condiciones de servicio, precisión y conexiones[1].

En este trabajo en particular se hará referencia mayormente a los transformadores de intensidad donde se abordan varias de sus características. Es válido aclarar que, los transformadores de tensión no constituyen objeto de estudio en esta investigación.

En el país existen empresas destinadas al acoplamiento y rediseño de dichos transformadores. La empresa de Desconectivos y Fusibles (GEISEL) es una de ellas, quien está destinada a suministrar a la Unión Eléctrica Nacional (UNE) estos transformadores. Para uso de la empresa, estos transformadores de medición provienen con características específicas que no siempre se encuentran dentro sus tipologías, en cuanto a su construcción, como es el caso de

que se necesite una nueva relación de transformación, o una nueva potencia y un nuevo error. Por ello, surge la necesidad de que se plantee la situación problemática siguiente:

¿Cómo desarrollar un método para el diseño de transformadores de medición, en particular, los transformadores de intensidad?

Para dar respuesta a dicha situación problemática se trazó como objetivo general el siguiente:

Elaborar un procedimiento para el diseño de transformadores de medición, en particular, los transformadores de intensidad de baja tensión con núcleo toroidal para su uso en redes de corriente alterna con intensidad nominal hasta 1500 A y frecuencia 60 Hz.

A partir del objetivo general se derogan los objetivos específicos siguientes:

- 1 Analizar los referentes teóricos asociados a los transformadores de intensidad, teniendo en cuenta: características constructivas, principio de funcionamiento, tipos según su aplicación y diseño, parámetros de diseño, clase de exactitud, valores nominales y requisitos de diseño según las normas vigentes de la IEC o UNE.
- 2 Elaborar un procedimiento para el diseño y recálculo de los transformadores de intensidad de baja tensión con núcleo toroidal.
- 3 Evaluar los resultados de la aplicación de este procedimiento mediante la comparación de los resultados del mismo con un diseño dado por un fabricante.

La hipótesis de investigación establecida para este trabajo es:

Los resultados obtenidos, mediante el procedimiento, constituyen una aproximación con bajo grado de error con respecto al diseño ofrecido por el fabricante.

La importancia de este trabajo está en el procedimiento que se expone para el diseño y recálculo de los transformadores de intensidad de baja tensión con núcleo toroidal con un bajo grado de error y con esto facilitar, al personal técnico, otras alternativas para su utilización en función de los requerimientos que se necesiten.

El aporte de este trabajo, desde el punto de vista metodológico, radica en el procedimiento expuesto para el diseño y recálculo de transformadores de intensidad de baja tensión con núcleo toroidal. Desde el punto de vista práctico, el aporte radica fundamentalmente en el amplio campo de acción que se puede lograr con la utilización de estos transformadores de intensidad que han sido recalculados para otras situaciones no contempladas por el fabricante.

---

El informe de esta investigación se encuentra estructurado en introducción, dos capítulos de desarrollo, conclusiones, recomendaciones y referencias bibliográficas.

En el primer capítulo se abordan todos los referentes teóricos relacionados con los transformadores de medición de intensidad como son: sus características constructivas, principio de funcionamiento, tipos según su aplicación y diseño, parámetros de diseño que influyen y definen su clase de exactitud, valores nominales y requisitos de diseño según las normas vigentes de la IEC o UNE.

En el segundo capítulo se exponen los procedimientos para el diseño y recálculo de los transformadores de medición de intensidad de baja tensión con núcleo toroidal. Además, se expone un ejemplo del recálculo de un transformador y se establece una comparación con el dado por el fabricante.

## **CAPÍTULO 1. REFERENTES TEÓRICOS ACERCA DE LOS TRANSFORMADORES DE MEDICIÓN**

En los sistemas eléctricos de corriente alterna se manejan normalmente diferencias de potencial e intensidades de corriente considerablemente altas, por ello y para proteger al personal, así como, aislar eléctricamente de los equipos primarios los equipos de medición y protección, es que estos son alimentados por magnitudes proporcionalmente menores, reproducidas fielmente del sistema a través de dispositivos especiales llamados transformadores de instrumentación[2].

### **1.1 Importancia de los transformadores de instrumentación**

El comportamiento y la selección de los transformadores de instrumentación resulta crítico para la protección y medición, ya que esta será solo tan eficientemente exacta como lo sean estos dispositivos, según los parámetros eléctricos que se manejen.

Además, la relación de las magnitudes de corriente y potencial en estos dispositivos logra una disminución de los niveles de aislamiento y capacidad, y por ende, del tamaño y costo del equipo[2].

Existen dos tipos de transformadores de instrumentación:

Los transformadores de intensidad, en los cuales la intensidad secundaria es, en las condiciones normales de uso, prácticamente proporcional a la intensidad primaria y se encuentra desfasada con relación a la misma un ángulo próximo a cero, para un sentido apropiado de las conexiones.

Los transformadores de tensión, en los cuales la tensión secundaria es, en las condiciones normales de uso, prácticamente proporcional a la tensión primaria y desfasada con relación a la misma un ángulo próximo a cero, para un sentido apropiado de las conexiones[2].

Como se mencionó anteriormente, este trabajo pretende enfocarse en los transformadores de intensidad (TC) de los cuales se muestra un ejemplo en la figura a continuación.



Figura 1.1. Transformadores de intensidad.

## 1.2 Definición de los transformadores de intensidad

Un transformador de intensidad es un dispositivo que provee una corriente proporcionalmente menor a la del circuito. Es válido aclarar que un transformador de intensidad, por su aplicación, se puede subdividir en dos categorías: transformador de medición y transformador de protección. No obstante, los transformadores de intensidad se diseñan para realizar ambas funciones y su corriente nominal por secundario puede ser de 1 o 5 Amperes. O sea que, desarrollan dos funciones: transformar la corriente y aislar los instrumentos de protección y medición conectados a los circuitos de alta tensión. En cuanto a su conexión con el circuito bajo prueba, el primario del transformador se conecta en serie con el circuito cuya intensidad se desea medir y el secundario se conecta en serie con las bobinas de corriente de los instrumentos de medición y de protección que requieran ser energizados[1].

Su principio de funcionamiento emana a partir del modelo del transformador ideal, con la realización de algunas consideraciones derivadas de su diseño y conexión dentro del sistema.

A continuación, se muestra el circuito equivalente que representa un transformador de intensidad.

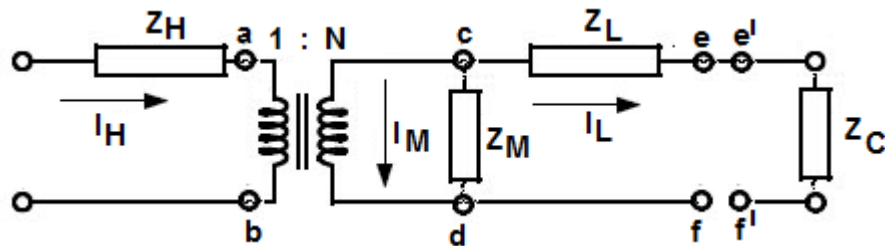


Figura 1.2. Circuito equivalente del transformador de intensidad o TC.

Del esquema de la figura 1.1 se tiene que:

$Z_H$ : Impedancia propia del devanado de alta tensión.

$Z_L$ : Impedancia propia del devanado de baja tensión.

$Z_M$ : Impedancia de magnetización del transformador.

$Z_C$ : Impedancia de carga en el secundario.

$I_H$ : Corriente primaria.

$I_L$ : Corriente que alimenta a la carga.

$I_M$ : Corriente de magnetización.

$1:N \rightarrow$  Relación de transformación “RTC”.

A partir del circuito equivalente y en función de algunas consideraciones tenidas en cuenta se puede plantear que:

El devanado primario está conectado en serie con la línea o alimentador, por lo que la corriente por primario  $I_H$  es la misma que la de línea y la impedancia  $Z_H$  se considera lo suficientemente pequeña que puede ser despreciada.

La impedancia de carga  $Z_C$  es la resultante de la conexión en serie de las bobinas de corriente de los equipos de protección y medición que el TC debe alimentar. Esta tiene siempre una magnitud pequeña para ofrecer una oposición mínima al paso de la corriente y no sacar al TC de sus características de diseño[1].

### 1.3 Tipos de transformadores de corriente según su construcción

Existen tres tipos de TC según su construcción:

- Tipo devanado primario: este como su nombre lo indica tiene más de una vuelta en el primario, y los devanados primario y secundario están completamente aislados y ensamblados permanentemente a un núcleo laminado. Esta construcción permite mayor precisión para bajas relaciones.
- Tipo barra: los devanados primarios y secundarios están completamente aislados y ensamblados permanentemente a un núcleo laminado. El devanado primario consiste en un conductor tipo barra que pasa por la ventana de un núcleo.
- Tipo boquilla o Bushing: el devanado secundario está completamente aislado y ensamblado permanentemente a un núcleo laminado. El conductor primario pasa a través del núcleo y actúa como devanado primario[3].

### 1.4 Condiciones de operación del transformador de corriente

#### 1.4.1 Condiciones de operación normal

Según, bajo condiciones normales de operación, la corriente secundaria será  $1/N$  veces la corriente primaria del “TC” y su diagrama vectorial de operación será aproximadamente el siguiente:

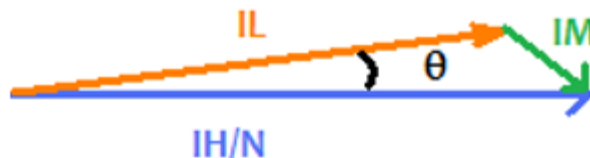


Figura 1.3. Diagrama fasorial de corriente en el secundario de un transformador de intensidad

Esto también se puede entender si se observa el nodo “c” de la figura 1.2, como se sabe, el primario es conectado abriendo el circuito del cual se tomara la muestra de corriente teniendo así la corriente  $I_H$ , que al ser reflejada al lado secundario por la misma relación de

transformación del transformador 1:N se tiene a nivel secundario  $\frac{I_H}{N}$ . Esta es la corriente que entra al nodo “c”, si se observa, hay dos corrientes que salen del mismo nodo, las cuales son  $I_L$  y  $I_M$ , por lo cual estas corrientes se relacionan vectorialmente como:

$$\frac{I_H}{N} = I_L + I_M \quad (1.1)$$

Donde el error de relación que representan la corriente de magnetización  $I_M$  y el ángulo  $\theta$  son despreciables, en la figura 1.3 han sido exagerados para poder ser observados, es decir, que bajo condiciones normales de operación la corriente  $\frac{I_H}{N}$  es prácticamente la misma corriente  $I_L$  debido a que el desfase  $\theta$  entre ambas es despreciable y la corriente de magnetización es muy pequeña[1].

#### **1.4.2 Condición de operación anormal**

La capacidad de transferencia de energía entre el circuito primario y el secundario, depende de las características de diseño y construcción del “TC”, como son: la capacidad de sus conductores, el nivel máximo de voltaje que debe soportar el “TC” entre espiras y las características magnéticas de su núcleo.

Se sabe que, en todo material magnético la permeabilidad se puede suponer como una función lineal de la densidad de flujo para determinados valores de esta última y que, rebasando este rango de valores, varía en forma no lineal haciendo tender la densidad a un máximo dado por las características propias del material[2].

### **1.5 Transformador de intensidad de baja tensión con núcleo toroidal**

#### **1.5.1 Características constructivas**

El primario de un transformador de intensidad consta de una o varias espiras, que se conectan en serie, con el circuito cuya intensidad se desea medir. Mientras que, el secundario alimenta los circuitos de intensidad de uno o varios aparatos de medida conectados en serie. El enrollado primario puede tener una, dos, o cuatro secciones, permitiendo una, dos o tres intensidades por primario nominales, mediante el adecuado acoplamiento de las secciones[4].

Pueden existir también, uno o varios enrollados secundarios, dispuestos cada uno sobre su circuito magnético. De esta manera, se garantiza que no exista influencia de un secundario sobre el otro.

El núcleo de los TC, normalmente, es de forma toroidal con el enrollado secundario uniformemente repartido por toda la estructura para reducir al mínimo el flujo de dispersión mientras que el enrollado primario consta de una o varias espiras que se conectan en serie con la línea.

Existen además, los TC en los que no está incorporado el primario. En este caso, el aislamiento principal puede estar en el primario (cables, pasamuros, etc.) o en el propio transformador[4].

### **1.5.2 Principio de funcionamiento**

Para los transformadores de intensidad en el estudio del comportamiento de las redes eléctricas se distinguen dos regímenes de funcionamiento:

- Normal: que corresponde a valores cercanos o inferiores a la corriente nominal de diseño de la red.
- Sobreintensidad: que se pone de manifiesto ante fallas de aislamiento, cortocircuitos, contactos accidentales entre conductores y/o tierra y maniobras inadecuadas, originándose valores de corriente muy superiores al valor nominal de la carga del circuito[5].

El transformador de intensidad debe soportar las condiciones impuestas en condiciones de sobreintensidad, sin que esto afecte sus características de funcionamiento normales. Cuando se realizan mediciones de valores correspondientes solo al régimen normal, la corriente por secundario que “detecta” el sistema de medida debe limitarse a un valor máximo para que los instrumentos no sean afectados por las altas corrientes debidas al régimen de sobreintensidad. Si el propósito es utilizar un sistema de protección o registro, es preciso “copiar” en el secundario la “imagen” de la corriente por primario, bajo el régimen de sobreintensidad; el rango de trabajo es ahora muy superior al caso anterior[5].

Para este caso es necesario utilizar entonces cuatro tipos distintos de TC, de acuerdo a la aplicación:

- ✓ Transformador de intensidad de medición: utilizado para adecuar los niveles de corriente al alcance de los instrumentos de medida, y/o aislarlos de la red.
- ✓ Transformador de intensidad de protección: utilizado para adecuar los niveles de corriente o tensión, a los valores nominales de las protecciones eléctricas de la red o equipos de registros transitorios, y/o aislarlos de la red. Estos son exclusivamente utilizados para éste fin y no pueden ser utilizados para medición.
- ✓ Transformador mixto: en este caso, los transformadores se diseñan para una combinación de los dos casos anteriores: un circuito con el núcleo de alta precisión para los circuitos de medición, y uno o dos circuitos más, con sus núcleos adecuados para los circuitos de protección.
- ✓ Transformador combinado: son aparatos que bajo una misma cubierta albergan un transformador de corriente y otro de tensión, mayormente usados en estaciones de interconexión fundamentalmente para reducir espacios[4].

Aprovechando la característica de saturación de los materiales magnéticos se puede definir el límite superior de la corriente por secundario. El comportamiento de los núcleos magnéticos para un TC de medición y protección se muestran a continuación.

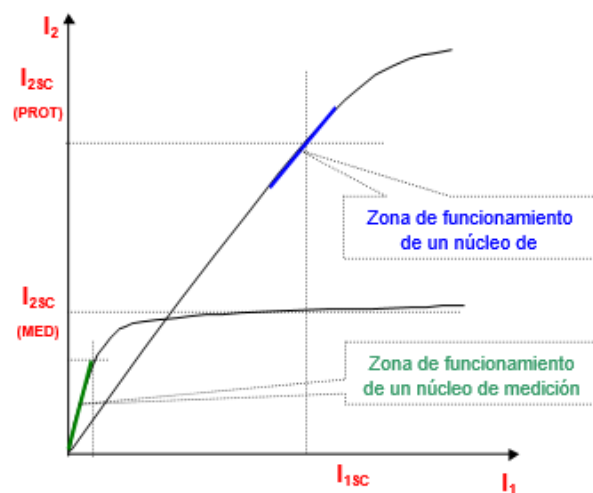


Figura 1.3. Gráfico de saturación de los materiales magnéticos.

En la figura 1.3 se puede observar que, para un mismo valor de corriente de cortocircuito ( $I_{ISC}$ ) en el caso del núcleo de TC de medición, la corriente por secundario que se obtiene es mucho menor que el caso de un núcleo de TC de protección.

Normalmente el rango de trabajo de un TC con núcleo para medición es de  $0,05 \cdot I_N \leq I \leq 1,2 \cdot I_N$ , siendo el límite superior el nivel de sobrecarga permanente. En el caso de un TC de protección, el rango de trabajo puede alcanzar hasta  $30 \cdot I_N$  [6].

### 1.5.3 Tipos según su aplicación y diseño

La construcción depende del uso a darle y condiciones de trabajo. Se pueden clasificar de la siguiente manera[7]:

- Uso:

- ✓ Portátiles de laboratorio: dimensiones y peso reducidos, núcleo de forma toroidal con los enrollados distribuidos, tensión de aislación no mayor a 2 KV, exactitud alta ( $\leq 0.5$ ) y relaciones múltiples de transformación (por varios enrollados primarios).
- ✓ Portátiles de campo (tipo pinza o cuadro): dimensiones y peso reducidos, núcleo seccionable de forma rectangular o toroidal con el enrollado secundario concentrado (mayor flujo de dispersión), tensión de aislación no mayor a 2 KV, exactitud media – baja (entre 0.5 y 3), posibilidad de relaciones múltiples a través del secundario, necesitan mayor corriente debido al entrehierro presente y pueden encontrarse con o sin instrumento indicador.
- ✓ De línea: de instalación fija, peso y dimensiones de acuerdo al nivel de corriente y aislación, constituyen parte de la línea y deben soportar todos los efectos derivados de regímenes anormales tanto de corriente como de sobre-tensiones.

- Construcción:

- ✓ De barra pasante: para altas corrientes ( $N_P = 1$ )
- ✓ Con bobinado primario colocado: para corrientes medias – bajas ( $N_P > 1$ )

- Nivel de Tensión (de acuerdo a la tensión de la red, lo que define el nivel de tensión de aislación entre el enrollado primario y el secundario):

- ✓ De baja tensión (hasta 400 V)
  - ✓ De media tensión (hasta 15 KV)
  - ✓ De alta tensión (hasta 33 KV)
  - ✓ De muy alta tensión (mayor a 33 KV)
- Ejecución: depende de la ubicación del TC y define el grado de protección contra agentes atmosféricos.
- ✓ Interior: para tensiones de red de hasta 132 KV (con aislantes especiales).
  - ✓ Intemperie: en subestaciones de media tensión (15 KV) a muy alta tensión.

#### 1.5.4 Parámetros de diseño que influyen y definen su clase de exactitud

Existen una serie de parámetros que por sus características influyen en y define la clase de exactitud en un transformador de medición. A continuación, se explican detalladamente cada uno de ellos[7].

- ✓ Corriente por primario nominal ( $I_{1n}$ ): está definida por las características de la carga y es la corriente nominal de trabajo para un régimen normal de funcionamiento.
- ✓ Corriente por secundario nominal ( $I_{2n}$ ): normalizada en los valores 1 A, 5 A,  $\frac{1}{\sqrt{3}}$  A y  $\frac{5}{\sqrt{3}}$  A.
- ✓ Relación nominal ( $KI_n$ ): cociente entre la corriente por primario nominal y la corriente por secundario nominal. Raramente se expresa como un valor; sino que se indica como sigue:  $\frac{I_{1N}}{I_{2N}}$  (por ejemplo:  $\frac{1000A}{5A}$ ).
- ✓ Carga de precisión o prestación (burden en inglés): potencia aparente nominal ( $S_N$ ) en los bornes del secundario, dada para la corriente por secundario nominal. También queda definida por la impedancia nominal  $Z_{2n}$  que puede conectarse en los bornes del secundario.

$$S_n = V_{2n} * I_{2n} = (I_{2n})^2 * Z_{2n} \quad (1.2)$$

- ✓ Error de relación ( $e_{REL}$ ): error introducido en la medición por el alejamiento, para distintos valores de corriente, de la relación entre corrientes por primario y

secundario ( $KI = \frac{I_1}{I_2}$ ) de la relación nominal  $KI_n$ . Este error se define en forma relativa.

$$e_{REL} = \frac{KI_n - KI}{KI} * 100 \quad (1.3)$$

- ✓ Error de fase ( $e_{FASE}$ ): error introducido en la medición por la aparición, para distintos valores de corriente, de una diferencia  $\beta$  de fase entre la corriente por secundario con respecto a la corriente por primario.
- ✓ Clase de exactitud: límite de error admisible tanto en la magnitud como en la diferencia de fase. Según [...] puede ser de 0,1 – 0,2 – 0,5 – 1 – 3 – 5 tal como se indica en la tabla 1.1. También puede ser denominada como clase de inexactitud.

Tabla 1.1. Clase de exactitud según norma IRAM 2344-1.

Clase de exactitud d (1)	± Error porcentual de relación				± Error de fase en							
					minuto				Centiradian = minuto*360*60/(2*π*10 <sup>6</sup> )			
	5%	20%	100%	120%	5%	20%	100%	120%	5%	20%	100%	120%
0.1	0.40	0.20	0.10	0.10	15	8	5	5	0.45	0.24	0.15	0.15
0.2	0.75	0.35	0.20	0.20	30	15	10	10	0.90	0.45	0.30	0.30
0.5	1.50	0.75	0.50	0.50	75	37	25	25	2.20	1.10	0.72	0.72
1.0	3.00	1.50	1.00	1.00	150	75	50	50	4.40	2.20	1.44	1.44

Clase de exactitud d (2)	± Error porcentual de relación	
	50%	120%
3	3	3
5	5	5

Para los transformadores con clases de 0,1 – 0,2 – 0,5 y 1, el error de intensidad y el desfase a la frecuencia asignada, no deberán sobrepasar los valores indicados en la tabla, cuando la carga por secundario esté comprendida entre el 25% y el 100% de la carga de precisión y factor de potencia de 0,8.

Cuando la carga sea inferior a 5 VA, se tiene que el factor de potencia será la unidad. En ningún caso la carga será inferior a 1 VA.

- ✓ Corriente térmica nominal de breve duración ( $I_{th}$ ): valor eficaz de la corriente por primario que el transformador está en condiciones de soportar durante un segundo, sin sufrir daños que le impidan su funcionamiento, estando el secundario en cortocircuito.
- ✓ Corriente dinámica nominal de breve duración ( $I_{dyn}$ ): valor de cresta de la corriente que el transformador puede de soportar, sin ser dañado eléctrica o mecánicamente por el esfuerzo resultante, estando el secundario en cortocircuito.
- ✓ Factor de seguridad nominal ( $F_{SN}$ ): valor que toma la relación entre corriente por primario y corriente por primario nominal ( $\frac{I_P}{I_{PN}}$ ) cuando el error de relación es igual al 10%, con el TC cargado con su prestación nominal.
- ✓ Tensión nominal de trabajo ( $U_N$ ): valor eficaz de la tensión de línea a línea del sistema donde va a ser conectado el primario del transformador.
- ✓ Frecuencia nominal: frecuencia de referencia a la que fue calibrado el TC. En sistemas estándares de potencia es de 50 o 60 Hz, en sistemas de tracción es de 25 Hz y sistemas de control y generación para excitación de 300 o 400 Hz.
- ✓ Tensión de aislación ( $U_A$ ): tensión máxima que soporta el TC entre los bornes primarios y secundarios.
- ✓ Ejecución (o condiciones de trabajo): interior o intemperie.
- ✓ Aplicación: medición o protección

### **1.6 Identificación de valores nominales y requisitos de diseño según las normas vigentes de la IEC o UNE**

Los valores normales o de diseño para los transformadores de intensidad se establecen teniendo en cuenta los requisitos de la norma UNE-EN 61869-1 que se exponen a continuación.

Requisitos generales:

- Valores normales de las intensidades por primario asignadas: para transformadores de simple relación de transformación los valores normales de las intensidades por primario asignadas en amperes son: 10 – 12,5 – 15 – 20 – 25 – 30 – 40 – 50 – 60 – 75 A y sus

múltiplos o submúltiplos decimales. Los valores subrayados son los que se escogen como preferencia.

- Valores normales de las intensidades por secundario asignadas: los valores normales de las intensidades secundarias son 1<sup>a</sup>, 2<sup>a</sup> y 5<sup>a</sup>, siendo este último el valor de preferencia.
- Valor normal de la intensidad térmica permanente asignada o intensidad de calentamiento: la intensidad térmica permanente asignada es igual a la intensidad por primario asignada.
- Valores normales de las potencias de precisión: los valores normales de las potencias de precisión hasta 30 VA son: 2,5 – 5 – 10 – 15 y 30 VA. No obstante, pueden elegirse valores superiores a 30 VA de acuerdo con las necesidades existentes.
- Intensidad de cortocircuito asignada: los transformadores de intensidad provistos de enrolados por primario compuesto por bobinas, o formados por un solo conductor, deberán cumplir lo especificado en los apartados de la norma.
- Intensidad térmica de cortocircuito asignada ( $I_{th}$ ): deberá especificarse para cada transformador el valor de la intensidad térmica de cortocircuito asignada.
- Intensidad dinámica asignada ( $I_{dyn}$ ): el valor normal de la intensidad dinámica asignada es igual a  $2,5 \cdot I_{th}$ .
- Clases de precisión normales: las clases de precisión normales de los transformadores de intensidad para medición es de: 0,1 – 0,2 – 0,5 – 1 – 3 – 5 según.
- El error de intensidad y el desfase a la frecuencia asignada, no deberán sobrepasar los valores de la tabla 1.2 según la norma IEC 60044-1. (1996).

Tabla 1.2. Límites de error de intensidad y de fase de los transformadores de intensidad.

Clase de precisión	Error de intensidad en %, $\pm$ , para los valores de intensidad expresados en % de la intensidad asignada				Desfase, $\pm$ , para los valores de intensidad expresados en % de la intensidad asignada							
					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

### **1.7 Consideraciones finales del capítulo**

- Los transformadores de instrumentación son parte esencial en un sistema eléctrico debido a que se hace posible la medición de los parámetros como voltaje y corriente, tanto para la medición, como para el control y protección del sistema eléctrico.
- Los transformadores de intensidad por su aplicación pueden ser de medición o de protección, no obstante, estos transformadores se diseñan para realizar ambas funciones.
- Según las normas consultadas, uno de los parámetros más importantes a tener en cuenta es la clase de precisión (clase de exactitud), que se define como el error máximo permisible en porcentaje que un transformador de instrumentación puede introducir cuando se utiliza para medición de potencia.

## **CAPÍTULO 2. PROCEDIMIENTO PARA EL DISEÑO DE TRANSFORMADORE DE INTENSIDAD DE BAJA TENSIÓN CON NÚCLEO TOROIDAL**

En el presente capítulo se aborda un procedimiento para el diseño de transformadores de intensidad de baja tensión con núcleos toroidales utilizados en las redes de corriente alterna con intensidad nominal hasta 1500 A y frecuencia 60 Hz. Dicho procedimiento se validó en el taller de transformadores de medición de la Fábrica de Fusibles y Desconectivos GEYSEL cumpliendo con los estándares establecidos por la norma UNE-EN 61869-1 que se expusieron con anterioridad.

### **2.1 Descripción del procedimiento**

El método que se aplica en este procedimiento es el método iterativo, método mediante el cual se trata de llegar a una solución a partir de aproximaciones sucesivas, empezando desde una estimación inicial hasta lograr los resultados esperados. Este procedimiento se aplica tanto para el diseño como para el recalcu del transformador, y parte de considerar o estimar inicialmente algunos parámetros físicos del transformador y a partir de estos valores se realiza un proceso de cálculo mediante el cual se obtienen los restantes parámetros de diseño. El proceso iterativo concluye una vez que se cumple con los errores de relación y de fase especificados[9].

## 2.2 Modelo matemático para el diseño del transformador de intensidad

### 2.2.1 Diseño del núcleo

En la construcción de los núcleos se utilizan aleaciones especiales a fin de lograr altas permeabilidades a bajas inducciones, con lazos de histéresis extremadamente estrechos, lo que conlleva a obtener pérdidas reducidas[2].

- Material para el núcleo

Para la construcción de transformadores de medición se recomienda utilizar acero al silicio de grano orientado por su alta permeabilidad, bajas pérdidas magnéticas y alta resistencia al envejecimiento.

- Densidad de flujo máxima

La inducción magnética es la responsable de las pérdidas y de la intensidad de campo necesaria, por lo que su valor debe acotarse. Normalmente se recomienda un valor de  $B = 0,05$  T, y en casos extremos, puede ser de  $B = 0,3$  T [1].

- Construcción

Si se desea lograr errores pequeños es imprescindible el uso de núcleos toroidales, lo cual permite además utilizar enrollados primarios de diferentes relaciones sin que la posición afecte la relación de transformación[2].

En la figura 2.1 se muestran las dimensiones características de un núcleo Toroidal.

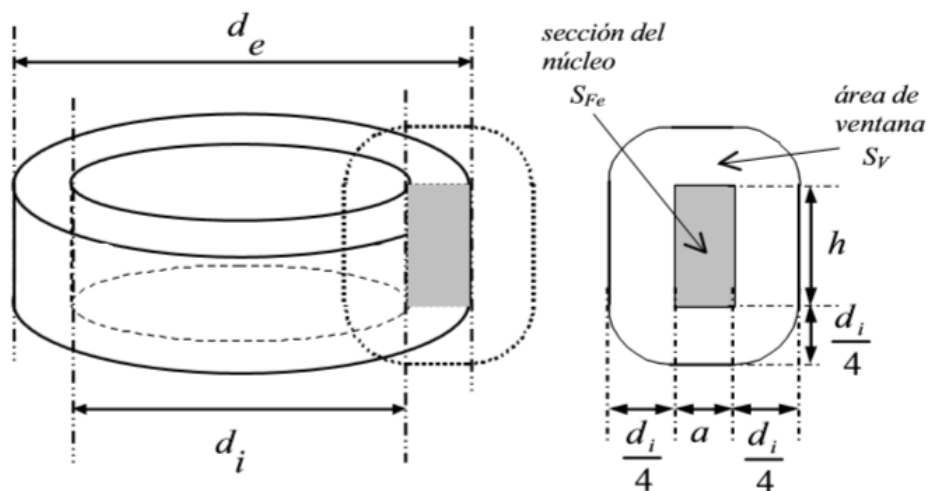


Figura 2.1. Representación de las dimensiones características de un núcleo toroidal.

Las especificaciones del núcleo son las siguientes:

- Diámetro interno del núcleo ( $d_i$ )

El orificio interno del núcleo tiene que tener un diámetro tal que permita alojar en su interior el conductor de mayor diámetro que suele utilizarse para conducir la corriente por primario nominal. Además, se debe prever un espacio para alojar el carrete y el devanado secundario.

- Diámetro exterior ( $d_e$ ), altura del toroide ( $h$ ) y sección horizontal ( $a$ )

Según la compañía italiana FEMAG Ferri Magteticici los valores típicos de diseño de transformadores de intensidad tienen en cuenta la relación siguiente:

$$\frac{d_e}{d_i} \cong 1,6 \quad (2.1)$$

$$h \cong d_e - d_i \quad (2.2)$$

$$a = \frac{d_e - d_i}{2} \quad (2.3)$$

Con estos valores se puede seleccionar de un catálogo ofrecido por el fabricante, un núcleo cuyas dimensiones estén en correspondencia con los valores calculados.

- Factor de apilamiento ( $F_c$ )

La relación entre el área efectiva y geométrica del núcleo se define como factor de apilamiento. El valor más frecuente de este factor en el diseño de los transformadores de medición es de 0,94 y 0,95.

### 2.2.2 Cálculo de los parámetros del núcleo

- Sección geométrica

La sección geométrica del núcleo se determina mediante la expresión 2.4 como sigue [9]:

$$S_{FeG} = h \cdot \left( \frac{d_e - d_i}{2} \right) (mm^2) \quad (2.4)$$

- Sección neta o área efectiva del núcleo

El área neta o efectiva, es el área de la sección transversal del núcleo que realmente está ocupada por el laminado. El valor de esta área está dado por el factor de apilamiento y se determina mediante la expresión 2.5 como [9]:

$$S_{Fe} = Fc \cdot S_{FeG} \text{ (mm}^2\text{)} \quad (2.5)$$

- Longitud media del núcleo

La longitud media del núcleo es la longitud de la línea media o central que lo encierra. En núcleos toroidales se determina a partir del diámetro exterior e interior del núcleo mediante la expresión 2.6 como [9]:

$$l_m = \pi \cdot \left( \frac{de + di}{2} \right) \text{ (mm)} \quad (2.6)$$

- Peso del núcleo

El peso del núcleo se define como el producto del volumen ocupado por el laminado por el peso específico del acero. Se determina mediante la expresión 2.7 como [9]:

$$p = l_m \cdot S_{Fe} \cdot \gamma \text{ (kg)} \quad (2.7)$$

donde:

$\gamma$ : Es el peso específico del acero ( $kg / mm^3$ )

- Pérdidas de núcleo

Las pérdidas de núcleo se determinan como el producto de las pérdidas específicas del acero por su peso mediante la expresión 2.8 como [9]:

$$P = \delta \cdot p \text{ (W)} \quad (2.8)$$

donde:

$\delta$ : Pérdidas específicas del acero ( $W / kg$ )

- Permeabilidad absoluta del material

La permeabilidad magnética depende del tipo de material ferromagnético del núcleo y su valor se determina en cada punto de la curva de magnetización mediante la expresión 2.9 como [9]:

$$\mu_a = \frac{B}{H} (\omega / Am) \quad (2.9)$$

donde:

$B$ : Densidad de flujo (T)

$H$ : Intensidad del campo magnético (A/m)

- Flujo magnético principal

El flujo magnético principal del transformador se determina mediante la expresión 2.10 como:

$$\phi = B \cdot S_{Fe} \cdot 10^{-6} (Wb) \quad (2.10)$$

### 2.2.3 Número de vueltas del devanado secundario

El número de vueltas del devanado secundario se determina mediante la expresión 2.11 como [10]:

$$n_s = \frac{E_s}{4,44 \cdot f \cdot \phi} (\text{vueltas}) \quad (2.11)$$

donde:

$E_s$ : Es la tensión inducida en el devanado secundario (V)

$f$ : Es la frecuencia (Hz)

Siendo la expresión para calcula la tensión inducida en el devanado secundario la siguiente [10]:

$$E_s = \frac{S_{VA}}{I_s} (V) \quad (2.12)$$

donde:

$S_{VA}$ : Potencia nominal de salida del transformador (VA)

$I_s$ : Intensidad nominal por el secundario del transformador (A)

### 2.2.4 Intensidad del primario

La intensidad por primario se determina mediante la expresión 2.13 como [10]:

$$I_p = n_s \cdot I_s \quad (A) \quad (2.13)$$

### 2.2.5 Sección del devanado secundario

La sección del conductor del devanado secundario depende de la intensidad de corriente que circula por este, del factor de sobrecarga y de la densidad de corriente seleccionada. Por otro lado, la densidad de corriente depende del tipo de material, el método de enfriamiento y de la potencia total del transformador. Para los transformadores de intensidad se recomienda escoger entre  $1 (A/mm^2)$  y  $2 (A/mm^2)$  [9]. La sección del conductor se puede determinar mediante la expresión 2.14 como:

$$S_{cus} = \frac{(F_{sc}/100) \cdot I_s}{J \cdot C_{es}} \quad (mm^2) \quad (2.14)$$

donde:

$F_{sc}$ : Es el Factor de sobrecarga (%)

$J$ : Densidad de corriente del devanado secundario.

$C_{es}$ : Conductores elementales del devanado secundario.

Nota: Los conductores elementales constituyen los circuitos paralelos que se forman en los devanados con el objetivo de reducir el diámetro de los conductores empleados. Esto ocurre cuando el área del conductor obtenido durante el diseño es superior a la mayor obtenida comercialmente. Se recomienda no emplear conductores redondos con un diámetro mayor de 2 mm ya que resulta difícil su manipulación [9].

### 2.2.6 Diámetro desnudo del devanado secundario

El diámetro del conductor del devanado secundario se determina mediante la expresión 2.15 como [9]:

$$d_{cus} = \sqrt{\frac{4 \cdot S_{cus}}{\pi}} \quad (mm)$$

### 2.2.7 Área teórica de la ventana del primario y el secundario

- Área teórica de la ventana del primario

$$S_{VP} = n_p \cdot \frac{S_{cup}}{F_{bp}} (mm^2) \quad (2.16)$$

$$S_{VP} = S_{cup} \text{ (para primario con barra o conductor pasante)}$$

Para determinar el área que ocupa el conductor primario es necesario tener en cuenta el espesor del aislamiento. En este caso se debe seleccionar el conductor de mayor diámetro posible que permita la conducción de la intensidad por primario calculada [9].

- Área teórica de la ventana del secundario

Para determinar el área teórica de la ventana del secundario se debe tener en cuenta la sección que ocupa el área activa del conductor más el aislamiento y el espacio en aire entre conductores. El factor que define la relación entre la sección activa de los conductores del devanado y el área de la ventana es el factor de espaciamento. Valores típicos del factor de espaciamento para conductores redondos se muestran en Figura 2.2 [9].

$$S_{VS} = n_s \cdot \frac{S_{cus} \cdot C_{es}}{F_{bs}} (mm^2) \quad (2.17)$$

donde:

$F_b$  es el factor de espaciamento del devanado.

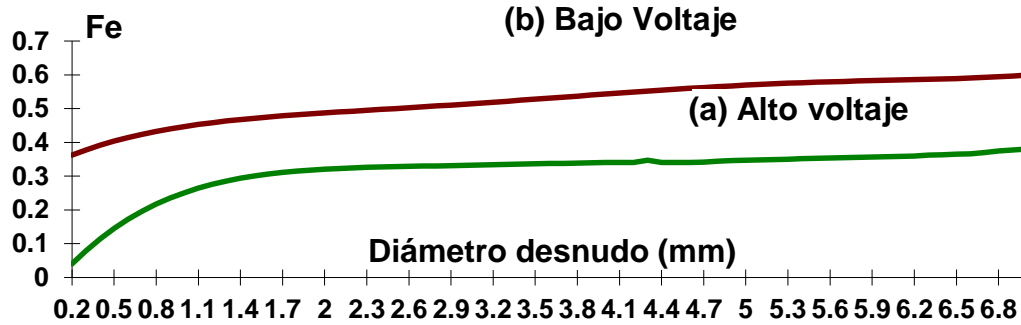


Figura 2.2. Factores de espaciado para conductores redondos.

### 2.2.8 Área disponible para los bobinados

El área disponible para los bobinados o área de la ventana debe tener un diámetro tal que permita alojar en su interior el conductor primario aislado, más el carrete o tapa de PVC y el devanado del secundario. Además, debe prever una holgura interna entre el carrete y el devanado secundario y entre el carrete y el conductor primario. De aquí se deduce que el área de la ventana tiene que ser mayor que el área teórica del primario y del secundario[9].

- Área de la ventana del toroide

El área interior del toroide se determina mediante la expresión 2.18 como:

$$S_V = \frac{d_i^2 \cdot \pi}{4} \text{ (mm}^2\text{)} \tag{2.18}$$

### 2.2.9 Resistencia del devanado secundario

Si se tiene en cuenta la resistividad del material conductor, su longitud y sección, entonces la resistencia de los devanados se puede determinar mediante la expresión 2.19 como [11]:

$$R_s = \rho_{cu} \cdot \frac{l_{es}}{S_{cus} \cdot C_{es}} \cdot n_s \text{ (}\Omega\text{)} \tag{2.19}$$

donde:

$l_{es}$  : longitud de cada espira (mm)

$\rho_{cu}$  : Resistividad del material conductor ( $\Omega \cdot \text{mm}^2 / \text{m}$ )

La longitud de cada espira se determina:

$$l_{es} = d_e - d_i + 2 \cdot h \quad (2.20)$$

Siendo para el cobre  $\rho_{cu} = 0,0175(\Omega \cdot mm^2 / m)$  a  $20^\circ C$

### 2.2.10 Número de capas del devanado secundario

El número de capas del devanado secundario se determina mediante la expresión 2.21 como[12]:

$$n_{cs} = \frac{n_s}{n_{scs}} \quad (2.21)$$

donde:

$$n_{scs} = \frac{\pi \cdot d_i}{d_{cus}} \text{ es el número de espiras por capa.} \quad (2.22)$$

### 2.2.11 Errores de relación y de fase.

En la figura 2.3 se muestra el diagrama fasorial de un transformador de intensidad mediante el cual se pueden obtener las ecuaciones para determinar los errores de relación y de fase[12].

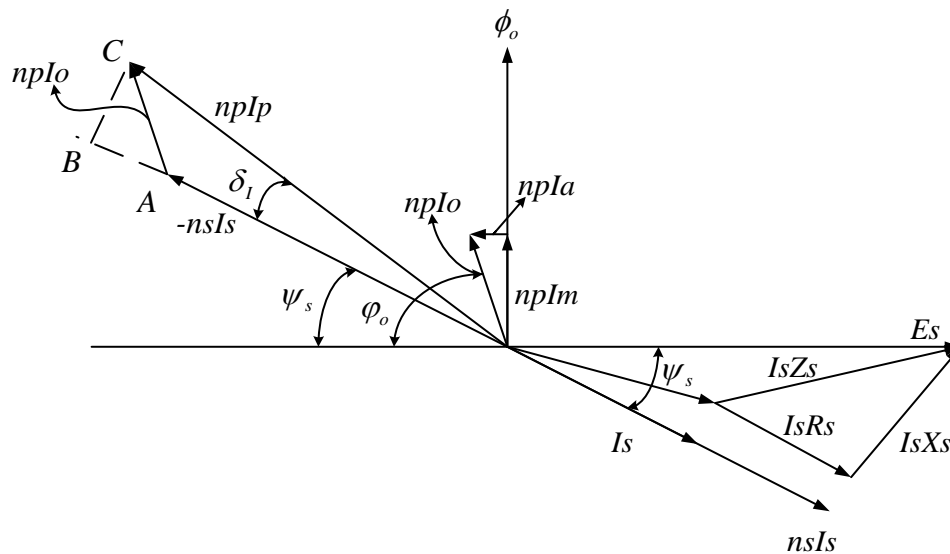


Figura 2.3. Diagrama fasorial del transformador de corriente

- Error de relación de intensidad

El error de relación de intensidad es el error que existe entre la relación de transformación real del transformador y su valor nominal. Su valor en función de los parámetros de diseño del transformador se determina mediante la expresión 2.23 como[12]:

$$f_I = \left[ 1 - \frac{n_s}{n_p \cdot K_{IN}} - \frac{I_o \cdot \cos(\varphi_o - \psi_s)}{I_s \cdot K_{IN}} \right] \times 100 \quad (2.23)$$

- Error de Fase de intensidad

El desfase entre la intensidad del secundario desfasada  $180^\circ$  y la intensidad del primario se conoce como error de fase o error angular del transformador. Su valor en función de los parámetros de diseño del transformador se determina mediante las expresiones 2.24 o 2.25 como[12]:

$$\delta_I = \frac{n_p \cdot I_o \cdot \text{sen}(\varphi_o - \psi_s)}{n_s \cdot I_s} \text{ rad} \quad (2.24)$$

$$\delta_I = 3438 \cdot \frac{n_p \cdot I_o \cdot \text{sen}(\varphi_o - \psi_s)}{n_s \cdot I_s} \text{ min} \quad (2.25)$$

donde:

$K_{IN}$  : Relación de transformación de intensidad nominal,

$I_o$  : Intensidad o corriente de vacío (A)

$\varphi_o$  : Ángulo entre la corriente en vacío total ( $I_o$ ) y su componente activa ( $I_a$ )

$\psi_s$  : Ángulo entre la fem del secundario ( $E_s$ ) y la corriente secundaria ( $I_s$ )

### 2.2.12 Impedancia de la carga

La impedancia de la carga se determina mediante la expresión 2.26 como[13]:

$$Z_C = \frac{S_C}{I_s^2} (\Omega) \quad (2.26)$$

donde:

$S_C$ : Potencia de la carga o Burden de prueba (VA)

La componente activa y reactiva de la impedancia de la carga se determina mediante las expresiones siguientes:

$$R_C = Z_C \cdot \cos(\theta) \ (\Omega) \quad (2.27)$$

$$X_C = Z_C \cdot \text{sen}(\theta) \ (\Omega) \quad (2.28)$$

Para factor de potencia de 0,8 (valor típico) se tiene que:

$$R_C = 0,8 \cdot Z_C$$

$$X_C = 0,6 \cdot Z_C$$

### 2.2.13 Impedancia del secundario

- Resistencia óhmica del secundario

La resistencia óhmica total del secundario se obtiene de sumar la resistencia del devanado secundario más la resistencia de la carga del transformador y se determina mediante la expresión 2.29 como [13]:

$$R_T = R_S + R_C \ (\Omega) \quad (2.29)$$

- Reactancia del secundario

La reactancia total de devanado secundario se obtiene de sumar la reactancia de dispersión del devanado secundario más la reactancia de la carga del transformador y se determina mediante la expresión 2.30 como [13]:

$$X_T = X_S + X_C \ (\Omega) \quad (2.30)$$

Si se tiene en cuenta que la reactancia de dispersión del devanado secundario es despreciable frente al valor de su resistencia según se establece en [13], entonces la reactancia total se puede determinar mediante la expresión 2.31 como:

$$X_T = X_C (\Omega) \quad (2.31)$$

La impedancia total del secundario se determina mediante la expresión 2.32 como:

$$Z_T = \sqrt{R_T^2 + X_C^2} (\Omega) \quad (2.32)$$

#### 2.2.14 Tensión inducida en el secundario bajo condiciones de carga

La tensión inducida en el devanado secundario del transformador bajo carga, se determina mediante la expresión 2.33 como[14]:

$$E_{S_{LOAD}} = I_S \cdot Z_T (V) \quad (2.33)$$

#### 2.2.15 Densidad de flujo en el núcleo

La densidad de flujo en el núcleo se determina mediante la expresión 2.34 como[12]:

$$B = \frac{E_s \cdot 10^6}{4,44 \cdot f \cdot n_s \cdot S_{Fe}} (T) \quad (2.34)$$

#### 2.2.16 Intensidad del campo magnético ( $H$ )

La intensidad del campo para cada valor de  $B$  se obtiene de la característica de magnetización del núcleo dada por el fabricante. Si no se tiene esta curva, entonces se puede obtener un valor aproximado, a partir del valor de la permeabilidad del material determinada para unas condiciones específicas y considerando un comportamiento lineal de la característica de magnetización. De esta forma se puede obtener un valor aproximado de la intensidad del campo magnético mediante la expresión 2.35 como sigue[12]:

$$H = \frac{B}{\mu_a} (A/m) \quad (2.35)$$

### 2.2.17 Corriente de magnetización y corriente debida a las pérdidas magnéticas

- Corriente de magnetización ( $I_m$ )

La corriente de magnetización es la que establece el flujo magnético principal del transformador y su valor se determina mediante la expresión 2.36 como[15]:

$$I_m = \frac{H \cdot l_m \cdot 10^{-3}}{n_p} \text{ (A)} \quad (2.36)$$

- Corriente debida a las pérdidas magnéticas ( $I_a$ )

Para determinar el valor de esta corriente primeramente es necesario determinar las pérdidas magnéticas del transformador. Las pérdidas magnéticas se obtienen de la característica de pérdidas del núcleo dada por el fabricante. Si no se tiene esta característica entonces es necesario calcular mediante la expresión 2.37 un coeficiente que relaciona la inducción magnética con las pérdidas específicas del acero para unas condiciones específicas. Con este coeficiente se determinan mediante la expresión 2.38 las pérdidas específicas del acero para cualquier valor de  $B$  comprendido en la zona de trabajo del núcleo, zona que se considera de igual forma con un comportamiento lineal[15].

$$\partial = \frac{B}{\delta} \quad (2.37)$$

donde:

$\delta$ : Pérdidas específicas del acero ( $W / kg$ )

**Siendo las pérdidas específicas del acero:**

$$\delta = \frac{B}{\partial} \quad (2.38)$$

- Pérdidas magnéticas

Las pérdidas magnéticas se determinan mediante la expresión 2.39 como:

$$P_w = \delta \cdot P \text{ (W)} \quad (2.39)$$

Con las pérdidas magnéticas y el valor de la tensión inducida se determina la corriente debida a estas pérdidas mediante la expresión 2.40 como[15]:

$$I_a = \frac{P_w}{E_s} (A) \quad (2.40)$$

### 2.2.18 Cálculo de la corriente en vacío

La corriente que consume el transformador en vacío se obtiene como la suma modular de la corriente de magnetización y la corriente debida a las pérdidas magnéticas y se determina mediante la expresión 2.41 como[16]:

$$I_o = \sqrt{I_m^2 + I_a^2} (A) \quad (2.41)$$

### 2.2.19 Cálculo del ángulo entre la corriente en vacío ( $I_o$ ) y la corriente debida a las pérdidas magnéticas ( $I_a$ )

El ángulo entre la corriente que consume el transformador en vacío ( $I_o$ ) y su componente activa ( $I_a$ ) se determina mediante la expresión 2.42 como[17]:

$$\varphi_o = 90^\circ - \text{Tan}^{-1} \frac{I_a}{I_m} \quad (2.42)$$

### 2.2.20 Cálculo del ángulo $\psi_s$ comprendido entre la tensión inducida ( $E_2$ ) y la corriente por secundario ( $I_s$ )

El ángulo entre la tensión inducida ( $E_2$ ) y la corriente por secundario ( $I_s$ ) se determina mediante la expresión 2.43 como[18]:

$$\psi_s = \tan g^{-1} \left( \frac{X_c}{R_T} \right) \quad (2.43)$$

### 2.3 Parámetros que influyen en los errores de relación y de fase

A partir de un análisis del diagrama fasorial mostrado en la figura 2.3 y de las ecuaciones de los errores de relación y de fase se llega a las conclusiones siguientes:

- Los errores de relación y de fase aumentan en la medida que aumenta la intensidad o corriente de vacío.
- La corriente de vacío depende de las características del núcleo, de sus dimensiones y de la calidad del material, del número de vueltas del devanado y de la magnitud y carácter de la carga del secundario. Por lo que se debe actuar sobre estos parámetros para disminuir los errores de relación y de ángulo.
- La intensidad de vacío disminuye en la medida que las características del núcleo sean mejores (alta permeabilidad magnética y bajas pérdidas por histéresis y corrientes parásitas) y disminuye la reluctancia del circuito magnético (resistencia magnética) lo cual se logra disminuyendo su longitud y/o aumentando la sección del núcleo.
- La disminución de la inducción magnética también conduce a una disminución de la intensidad de vacío por lo que en los transformadores de intensidad se debe escoger un valor de inducción de  $B = 0,05$  [T], y en casos extremos  $B = 0,3$  [T] como se planteó en el epígrafe 2.2.1.
- Con relación al carácter de la carga, un aumento del número de instrumentos conectados al TC conduce a un aumento de la impedancia del secundario y de la fem  $E_2$  y esto a su vez provoca un aumento de intensidad de vacío incrementándose los errores del TC.
- La relación entre la resistencia y reactancia del devanado secundario y los instrumentos conectados al TC influyen en los errores de relación y de fase. El ángulo  $\varphi_o$  no depende prácticamente de esta relación, no siendo así para el ángulo  $\psi_s$  que si va a depender de esta relación. Con el aumento de la reactancia de la carga aumenta el ángulo  $\psi_s$ , lo cual provoca un aumento del error de relación, dado por el aumento de la relación  $\cos(\varphi_o - \psi_s)$ . Por otro lado, no ocurre así con el error de fase, el cual disminuye con el aumento del ángulo  $\psi_s$ , que viene dado por la disminución de la relación  $\text{sen}(\varphi_o - \psi_s)$  [19].

Todo lo expuesto con anterioridad concierne al proceso de diseño de un transformador de intensidad de baja tensión con núcleo toroidal. A continuación, se muestran los pasos a seguir para el recálculo del mismo, o sea, ahora se toma como punto de partida una estructura ferromagnética dada.

#### **2.4 Pasos a seguir para el recálculo de un transformador de intensidad de baja tensión con núcleo toroidal.**

El procedimiento para el recálculo del transformador se basa en determinar para una estructura ferromagnética dada, los valores nominales o de diseño que definen fundamentalmente su potencia de salida, corriente por los devanados y clase de precisión[20].

Se definen los valores nominales o de diseño del transformador según lo establecido en el punto 2 de este procedimiento.

1. Los valores nominales que se deben definir y con los cuales se trabaja son:
  - Clase de precisión
  - Intensidad del secundario ( $A$ )
  - Potencia de salida ( $VA$ ). Se define la potencia tentativa para el diseño del transformador, para ello es aconsejable apoyarse en catálogos del fabricante del núcleo y o en la propia experiencia del diseñador.
  - Frecuencia ( $Hz$ )
  - $F_{sc}$ : Factor de sobrecarga (%)
2. Definición de los parámetros constructivos del núcleo.

Estos parámetros se obtienen de las especificaciones técnicas del fabricante, catálogos, tablas de diseño, certificados de calidad o de ensayos realizados. En la figura 2.1 se muestran las dimensiones características de un núcleo toroidal. Los parámetros constructivos del núcleo que se deben definir y con los cuales se trabaja son:

- $h$ : Altura del Toroide (mm)
- $d_e$ : Diámetro exterior (mm)
- $d_i$ : Diámetro interior (mm)
- $B$ : Densidad de flujo (T)

- $H$ : Intensidad del campo magnético (A/m)
  - $F_c$ : Factor de apilamiento
  - $\gamma$ : Peso específico del acero ( $kg/mm^3$ )
  - $\delta_{max}$ : Pérdidas específicas del acero ( $W/kg$ )
3. Calcular la sección geométrica del núcleo mediante la expresión 2.4.
  4. Con el valor de la sección geométrica del núcleo y el factor de apilamiento definido en el punto 2, se determina la sección neta del núcleo mediante la expresión 2.5.
  5. Calcular la longitud media del núcleo mediante la expresión 2.6.
  6. Calcular el peso del núcleo mediante la expresión 2.7.
  7. Calcular las pérdidas del núcleo mediante la expresión 2.8.
  8. Calcular la permeabilidad del material mediante la expresión 2.9.
  9. Calcular el valor del flujo magnético principal mediante la expresión 2.10.
  10. Calcular el valor de la tensión inducida mediante la expresión 2.12.
  11. Con el valor de la tensión inducida y del flujo magnético principal se determina el número de vueltas tentativo del devanado secundario mediante la expresión 2.11.
  12. Calcular la intensidad o corriente por el primario del transformador mediante la expresión 2.13
  13. Calcular la sección del devanado secundario mediante la expresión 2.14.
  14. Calcular el diámetro desnudo del devanado secundario mediante la expresión 2.15.
  15. Con los valores de la sección y del diámetro del conductor secundario se escoge de un catálogo el número del conductor cuya sección y diámetro estén lo más próximo posible a los valores calculados.
  16. Determinar el diámetro y la sección del conductor primario.

Si se tiene en cuenta el valor de la intensidad del primario obtenida en 2.12, el diámetro y la sección del conductor primario se seleccionan según la tabla A1 del Anexo A [2].

17. Calcular el área teórica de la ventana del primario y el secundario.

El área teórica de la ventana del primario y del secundario se determina mediante las expresiones 2.16 y 2.17 respectivamente.

18. Calcular el área de la ventana disponible para los bobinados mediante la expresión 2.18.

Se debe comprobar que el área teórica del primario y el secundario sea menor o igual que el área disponible para los bobinados (área real de la ventana). De no ser así y se desee mantener fija la corriente por el secundario del transformador es necesario recalcular el número de vueltas del secundario para otro valor de corriente por primario y realizar nuevamente los cálculos a partir del punto # 12 hasta lograr que el área real de la ventana sea mayor que el área teórica del primario y el secundario.

19. Calcular la longitud de una espira del devanado secundario según la expresión 2.20.
20. Calcular la resistencia del devanado secundario mediante la expresión 2.19.
21. Calcular el número de capas del devanado secundario mediante la expresión 2.21.
22. Calcular el número de espiras por capa mediante la expresión 2.22.
23. Calcular la impedancia de la carga mediante la expresión 2.26.

Nota: A partir de este punto se realizan los cálculos para el 5%, 20%, 100% y 120% de la intensidad asignada del transformador.

24. Calcular las componentes activa y reactiva de la carga mediante las expresiones 2.27 y 2.28 respectivamente.
25. Calcular la resistencia total del secundario del transformador mediante la expresión 2.29.
26. Calcular la reactancia total del secundario del transformador mediante las expresiones 2.30 o 2.31 según corresponda.
27. Calcular la impedancia total del secundario mediante la expresión 2.32.
28. Calcular la tensión inducida mediante la expresión 2.33.
29. Calcular el nuevo valor de la densidad de flujo para cada condición de carga mediante la expresión 2.34.
30. Calcular la intensidad del campo magnético mediante la expresión 2.35.
31. Calcular la intensidad o corriente de magnetización mediante la expresión 2.36.
32. Calcular las pérdidas magnéticas mediante la expresión 2.39.
33. Calcular la intensidad o corriente debida a las pérdidas magnéticas mediante la expresión 2.40.
34. Calcular la intensidad o corriente de vacío mediante la expresión 2.41.
35. Calcular el ángulo entre la intensidad de vacío y la intensidad debida a las pérdidas magnéticas mediante la expresión 2.42.

36. Calcular el ángulo entre la tensión inducida en el secundario y la intensidad o corriente por secundario mediante la expresión 2.43.
37. A partir de todos estos valores calculados, para cada condición de carga, se determinan los errores de relación y de fase mediante las expresiones 2.23 y 2.24 o 2.25 respectivamente.

Los errores de relación y de fase que se obtienen deben ser menores que los que se muestran en la tabla 1.2 para cada condición de carga. De no ser así es necesario recalcular los parámetros de diseño del transformador y volver a realizar los cálculos hasta lograr que los errores sean menores que los especificados en dicha tabla.

Si se tienen en cuenta los criterios expuestos con anterioridad, los parámetros de diseño sobre los que se debe actuar son:

- Número de vueltas del devanado secundario.
- Sección o área efectiva del devanado secundario.
- Potencia de salida del transformador.
- Intensidad primaria.

## **2.5 Pasos a seguir para el diseño de un transformador de intensidad de baja tensión con núcleo toroidal**

El procedimiento para el diseño consiste en seleccionar las características del núcleo y los devanados a utilizar para determinadas prestaciones del transformador en cuanto a la intensidad por primario y secundario, clase de precisión, potencia de salida y factor de sobrecarga[21].

En este caso se definen los parámetros del núcleo teniendo en cuenta los criterios expuestos en el epígrafe 2.2.1. No obstante, de igual forma se deben tener en cuenta todos los criterios expuestos con anterioridad.

## 2.6 Recálculo de un transformador de intensidad desde un núcleo ya diseñado

Los datos que se tienen del transformador son:

- Relación de transformación 200/5
- Clase 0.5
- Potencia de Salida 10 VA
- Tensó de Aislamiento 1 KV
- Frecuencia 60 Hz
- Nivel de Aislamiento 3 KV en 1 min
- Clase Térmica 130°C

Datos de construcción:

- Núcleo toroidal en acero al silicio de grano orientado, aislado dos caras tipo MOH 27

Datos Mecánicos:

- $d_i$  40mm
- $d_e$  65mm
- $h$  32mm
- $L_m$  16.5 cm
- $K$  0.94 (coeficiente de llenado)
- Peso específico 7.65gr/cmm<sup>3</sup>

$$\frac{d_e}{d_i} \cong \frac{65}{40} \cong 1,6$$

$$h \cong d_e - d_i \cong 65 - 40 \cong 32$$

$$a = \frac{d_e - d_i}{2} = \frac{65 - 40}{2} = 12.5$$

Sección geométrica:

$$S_{FeG} = h \cdot \left( \frac{d_e - d_i}{2} \right) (mm^2) = 32 * \frac{65 - 40}{2} = 400 mm^2$$

Sección neta o área efectiva del núcleo:

$$S_{Fe} = Fc \cdot S_{FeG} \text{ (mm}^2\text{)} = 0.94 * 400 = 376 \text{ mm}^2$$

Longitud media del núcleo:

$$l_m = \pi \cdot \left( \frac{de + di}{2} \right) \text{ (mm)} = 3.14 * \frac{65 + 40}{2} = 164.93 \text{ mm}$$

Peso del núcleo:

$$p = l_m \cdot S_{Fe} \cdot \gamma \text{ (kg)} = 0.164 * 0.376 * 7.65 = 0.471 \text{ kg}$$

Pérdidas de núcleo:

$$P = \delta \cdot p \text{ (W)} = 0.09 * 10 = 0.9 \text{ W}$$

Permeabilidad absoluta del material:

$$\mu_a = \frac{B}{H} = \frac{0.5}{0.07} = 7.14 \text{ W/Am}$$

Flujo magnético principal:

$$\phi = B \cdot S_{Fe} \cdot 10^{-6} = 0.5 * 376 * 10^{-6} = 0.000188 \text{ wb}$$

Número de vueltas del devanado secundario:

$$n_s = \frac{E_s}{4,44 \cdot f \cdot \phi} = \frac{2}{4.44 * 60 * 0.000188} = 39.93 \approx 40$$

donde:  $E_s = \frac{S_{VA}}{I_s} = \frac{10}{5} = 2 \text{ V}$

Intensidad del primario:

$$I_p = n_s \cdot I_s = 40 * 5 = 200 \text{ A}$$

Sección del devanado secundario:

$$S_{cus1} = \frac{(F_{sc}/100) \cdot I_s}{J \cdot C_{es}} = \frac{\frac{120}{100} * 5}{3.18 * 1} = 1.88 \text{ mm}^2$$

$$S_{cus2} = \frac{(F_{sc}/100) \cdot I_s}{J \cdot C_{es}} = \frac{\frac{120}{100} * 5}{8.02 * 0.63} = 1.18 \text{ mm}^2$$

Diámetro desnudo del devanado secundario:

$$d_{cus1} = \sqrt{\frac{4 \cdot S_{cus1}}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 * 1.88}{\pi}} = 0.872 \text{ mm}$$

$$d_{cus2} = \sqrt{\frac{4 \cdot S_{cus2}}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 * 1.18}{\pi}} = 0.691 \text{ mm}$$

Área teórica de la ventana del secundario:

$$S_{VS1} = n_s \cdot \frac{S_{cus1} \cdot C_{es}}{F_{bs}} = 40 * \frac{1.88 * 1}{0.44} = 170.90 \text{ mm}^2$$

$$S_{VS2} = n_s \cdot \frac{S_{cus2} \cdot C_{es}}{F_{bs}} = 40 * \frac{1.18 * 0.63}{0.41} = 72.52 \text{ mm}^2$$

Área de la ventana del toroide:

$$S_V = \frac{d_i^2 \cdot \pi}{4} = \frac{40^2 * \pi}{4} = 1256.6 \text{ mm}^2$$

Resistencia del devanado secundario:

$$R_{s1} = \rho_{cu} \cdot \frac{l_{es}}{S_{cus1} \cdot C_{es}} \cdot n_s = 0.0175 * \frac{0.089}{1.88 * 1} * 40 = 0.033 \Omega$$

$$R_{s2} = \rho_{cu} \cdot \frac{l_{es}}{S_{cus2} \cdot C_{es}} \cdot n_s = 0.0175 * \frac{0.089}{1.18 * 0.63} * 40 = 0.081 \Omega$$

donde el equivalente de las dos resistencias debido a que están en paralelo será:

$$R_{seq} = R_s = \frac{R_{s1} * R_{s2}}{R_{s1} + R_{s2}} = 0.023\Omega$$

Número de capas del devanado secundario:

$$n_{cs1} = \frac{n_s}{n_{scs1}} = \frac{40}{144.10} = 0.277$$

donde:  $n_{scs1} = \frac{\pi \cdot d_i}{d_{cus1}} = \frac{3.14 * 40}{0.872} = 144.10$

$$n_{cs2} = \frac{n_s}{n_{scs2}} = \frac{40}{181.85} = 0.214$$

donde:  $n_{scs2} = \frac{\pi \cdot d_i}{d_{cus2}} = \frac{3.14 * 40}{0.691} = 181.85$

### **Diseño dado por el fabricante**

En el diseño que ofrece el fabricante los resultados con los que se cuenta son:

- Error de relación:  $\pm 0.5 \%$

A partir de aquí, se analizarán varios casos con vistas a comparar los errores de relación obtenidos con el dado por el fabricante.

### **Caso #1: 100% de la intensidad nominal.**

Teniendo en cuenta una corriente de carga igual a la corriente nominal del transformador el diseño queda:

Impedancia de la carga:

$$Z_C = \frac{S_C}{I_s^2} = \frac{10}{5^2} = 0.4\Omega$$

donde:  $R_C = Z_C \cdot \cos(\theta) = 0.8 * 0.4 = 0.32\Omega$     y     $X_C = Z_C \cdot \text{sen}(\theta) = 0.6 * 0.4 = 0.24\Omega$

Impedancia del secundario:

$$R_T = R_s + R_C = 0.023 + 0.32 = 0.343\Omega$$

Reactancia del secundario:

$$X_T = X_C = 0.24\Omega$$

Impedancia total del secundario:

$$Z_T = \sqrt{R_T^2 + X_C^2} = \sqrt{0.343^2 + 0.24^2} = 0.418\Omega$$

Tensión inducida en el secundario bajo condiciones de carga:

$$E_{S_{LOAD}} = I_S \cdot Z_T = 5 * 0.418 = 2.09\Omega$$

Densidad de flujo en el núcleo:

$$B = \frac{E_s \cdot 10^6}{4,44 \cdot f \cdot n_s \cdot S_{Fe}} = \frac{2.09 * 10^6}{4.44 * 60 * 40 * 376} = 0.521 \approx 5T$$

Intensidad del campo magnético:

$$H = \frac{B}{\mu_a} = \frac{0.5}{0.052} = 9.61A / M$$

Corriente de magnetización:

$$I_m = \frac{H \cdot l_m \cdot 10^{-3}}{n_p} = \frac{9.61 * 0.164 * 10^{-6}}{1} = 1.57A$$

Corriente debida a las pérdidas magnéticas referidas al primario:

$$I_a = \frac{P_w}{E_s} = \frac{0.9}{2.09} = 0.019 * 40 = 0.78A$$

donde:  $P_w = \delta \cdot P = 0.09 * 0.456 = 0.9W$  y  $\delta = \frac{B}{\partial} = \frac{0.5}{5.5} = 0.09$

Corriente en vacío:

$$I_o = \sqrt{I_m^2 + I_a^2} = \sqrt{(1.57^2 + 0.78^2)} = 1.70A$$

Ángulo entre la corriente que consume el transformador en vacío ( $I_o$ ) y su componente activa ( $I_a$ ):

$$\varphi_o = 90^\circ - \tan^{-1} \frac{I_a}{I_m} = 90^\circ - \tan^{-1} \frac{0.78}{1.51} = 62.68$$

$$\psi_s = \tan^{-1} \left( \frac{X_C}{R_T} \right) = \tan^{-1} \frac{0.24}{0.343} = 34.98$$

Error de relación de intensidad:

$$f_I = \left[ 1 - \frac{n_s}{n_p \cdot K_{IN}} - \frac{I_o \cdot \cos(\varphi_o - \psi_s)}{I_s \cdot K_{IN}} \right] \times 100 = 1 - \frac{40}{1 \cdot 40} - \frac{1.70 \cdot \cos(62.68 - 34.98)}{5 \cdot 40} = \pm 0.752$$

Error de Fase de intensidad

$$\delta_I = 3438 \cdot \frac{n_p \cdot I_o \cdot \sin(\varphi_o - \psi_s)}{n_s \cdot I_s} = 3438 \cdot \frac{1 \cdot 1.70 \cdot \sin(62.68 - 34.98)}{40 \cdot 5} = \pm 13.58 \text{ min}$$

Como se puede apreciar en los resultados, el error de relación no está dentro de los parámetros establecidos en las normas.

### **Caso #2. 120% de la intensidad nominal.**

Considerando una sobrecarga de un 20% por encima del valor de la corriente nominal del transformador se tiene que:

Impedancia de la carga:

$$Z_C = \frac{S_C}{I_s^2} = \frac{10}{6^2} = 0.27 \Omega$$

donde:  $R_C = Z_C \cdot \cos(\theta) = 0.8 \cdot 0.27 = 0.21 \Omega$     y     $X_C = Z_C \cdot \sin(\theta) = 0.6 \cdot 0.27 = 0.162 \Omega$

Impedancia del secundario:

$$R_T = R_S + R_C = 0.023 + 0.21 = 0.233\Omega$$

Reactancia del secundario:

$$X_T = X_C = 0.162\Omega$$

Impedancia total del secundario:

$$Z_T = \sqrt{R_T^2 + X_C^2} = \sqrt{0.233^2 + 0.162^2} = 0.283\Omega$$

Tensión inducida en el secundario bajo condiciones de carga:

$$E_{SLOAD} = I_S \cdot Z_T = 6 * 0.283 = 1.70\Omega$$

Densidad de flujo en el núcleo:

$$B = \frac{E_s \cdot 10^6}{4,44 \cdot f \cdot n_s \cdot S_{Fe}} = \frac{1.70 * 10^6}{4.44 * 60 * 40 * 376} = 0.424 \approx 0.4T$$

Intensidad del campo magnético:

$$H = \frac{B}{\mu_a} = \frac{0.4}{0.052} = 7.63A / M$$

Corriente de magnetización:

$$I_m = \frac{H \cdot l_m \cdot 10^{-3}}{n_p} = \frac{7.63 * 0.164 * 10^{-6}}{1} = 1.25A$$

Corriente debida a las pérdidas magnéticas referida al primario:

$$I_a = \frac{P_w}{E_s} = \frac{0.03}{1.70} = 0.018 * 40 = 0.72A$$

donde:  $P_w = \delta \cdot P = 0.07 * 0.456 = 0.03W$  y  $\delta = \frac{B}{\partial} = \frac{0.4}{5.5} = 0.07$

Corriente en vacío:

$$I_o = \sqrt{I_m^2 + I_a^2} = \sqrt{1.25^2 + 0.72^2} = 1.44A$$

Ángulo entre la corriente que consume el transformador en vacío ( $I_o$ ) y su componente activa ( $I_a$ ):

$$\varphi_o = 90^\circ - \tan^{-1} \frac{I_a}{I_m} = 90^\circ - \tan^{-1} \frac{0.72}{1.25} = 60.05$$

$$\psi_s = \tan^{-1} \left( \frac{X_C}{R_T} \right) = \tan^{-1} \frac{0.21}{0.283} = 37.64$$

Error de relación de intensidad:

$$f_I = \left[ 1 - \frac{n_s}{n_p \cdot K_{IN}} - \frac{I_o \cdot \cos(\varphi_o - \psi_s)}{I_s \cdot K_{IN}} \right] \times 100 = \left[ 1 - \frac{40}{1 \cdot 40} - \frac{1.44 \cdot \cos(60.05 - 37.64)}{6 \cdot 40} \right] \times 100 = \pm 0.654$$

Error de Fase de intensidad:

$$\delta_I = 3438 \cdot \frac{n_p \cdot I_o \cdot \sin(\varphi_o - \psi_s)}{n_s \cdot I_s} = 3438 \cdot \frac{1 \cdot 1.44 \cdot \sin(60.05 - 37.64)}{40 \cdot 6} = 7.86 \text{ min}$$

En este caso, como en el anterior, el error de relación está fuera de los parámetros establecidos, por tanto, hay que pasar a calcular con una potencia de salida de 5VA.

### **Caso #3: 100% de la intensidad nominal y 5 VA.**

Teniendo en cuenta una corriente de carga igual a la corriente nominal del transformador, pero con una potencia de salida 5 VA el diseño queda:

Impedancia de la carga:

$$Z_C = \frac{S_C}{I_s^2} = \frac{5}{5^2} = 0.2 \Omega$$

donde:  $R_C = Z_C \cdot \cos(\theta) = 0.8 \cdot 0.2 = 0.16 \Omega$     y     $X_C = Z_C \cdot \sin(\theta) = 0.6 \cdot 0.2 = 0.12 \Omega$

Impedancia del secundario:

$$R_T = R_s + R_C = 0.023 + 0.16 = 0.183 \Omega$$

Reactancia del secundario:

$$X_T = X_C = 0.12\Omega$$

Impedancia total del secundario:

$$Z_T = \sqrt{R_T^2 + X_C^2} = \sqrt{0.183^2 + 0.12^2} = 0.218\Omega$$

Tensión inducida en el secundario bajo condiciones de carga:

$$E_{S\text{LOAD}} = I_S \cdot Z_T = 5 * 0.218 = 1.09\Omega$$

Densidad de flujo en el núcleo:

$$B = \frac{E_s \cdot 10^6}{4,44 \cdot f \cdot n_s \cdot S_{Fe}} = \frac{1.09 * 10^6}{4.44 * 60 * 40 * 376} = 0.27\text{T}$$

Intensidad del campo magnético:

$$H = \frac{B}{\mu_a} = \frac{0.27}{0.052} = 5.19\text{A/M}$$

Corriente de magnetización:

$$I_m = \frac{H \cdot l_m \cdot 10^{-3}}{n_p} = \frac{5.19 * 0.164 * 10^{-6}}{1} = 0.861\text{A}$$

Corriente debida a las pérdidas magnéticas referida al primario:

$$I_a = \frac{P_w}{E_s} = \frac{0.020}{1.09} = 0.018 * 40 = 0.75\text{A}$$

donde:  $P_w = \delta \cdot P = 0.045 * 0.456 = 0.020\text{W}$     y     $\delta = \frac{B}{\partial} = \frac{0.27}{6} = 0.045$

Corriente en vacío:

$$I_o = \sqrt{I_m^2 + I_a^2} = \sqrt{0.86^2 + 0.75^2} = 1.14\text{A}$$

Ángulo entre la corriente que consume el transformador en vacío ( $I_o$ ) y su componente activa ( $I_a$ ):

$$\varphi_o = 90^\circ - \tan^{-1} \frac{I_a}{I_m} = 90^\circ - \tan^{-1} \frac{0.45}{1.148 \cdot 10^{-5}} = 48.90$$

$$\psi_s = \tan^{-1} \left( \frac{X_C}{R_T} \right) = \tan^{-1} \frac{0.12}{0.183} = 33.25$$

Error de relación de intensidad:

$$f_I = \left[ 1 - \frac{n_s}{n_p \cdot K_{IN}} - \frac{I_o \cdot \cos(\varphi_o - \psi_s)}{I_s \cdot K_{IN}} \right] \times 100 = 1 - \frac{40}{1 \cdot 40} - \frac{1.14 \cdot \cos(48.90 - 33.25)}{5 \cdot 40} = \pm 0.5482$$

Error de Fase de intensidad

$$\delta_I = 3438 \cdot \frac{n_p \cdot I_o \cdot \sin(\varphi_o - \psi_s)}{n_s \cdot I_s} = 3438 \cdot \frac{1 \cdot 1.14 \cdot \sin(48.90 - 33.25)}{40 \cdot 5} = 5.28 \text{ min}$$

**Caso #4. 120% de la intensidad nominal y con 5 VA.**

Considerando una sobrecarga de un 20% por encima del valor de la corriente nominal del transformador y con una potencia de salida de 5VA se tiene que:

Impedancia de la carga:

$$Z_C = \frac{S_C}{I_s^2} = \frac{5}{6^2} = 0.13 \Omega$$

donde:  $R_C = Z_C \cdot \cos(\theta) = 0.8 \cdot 0.13 = 0.104 \Omega$  y  $X_C = Z_C \cdot \sin(\theta) = 0.6 \cdot 0.13 = 0.078 \Omega$

Impedancia del secundario:

$$R_T = R_s + R_C = 0.023 + 0.104 = 0.127 \Omega$$

Reactancia del secundario:

$$X_T = X_C = 0.078 \Omega$$

Impedancia total del secundario:

$$Z_T = \sqrt{R_T^2 + X_C^2} = \sqrt{0.127^2 + 0.078^2} = 0.149\Omega$$

Tensión inducida en el secundario bajo condiciones de carga:

$$E_{S\text{ LOAD}} = I_S \cdot Z_T = 6 * 0.149 = 0.894\Omega$$

Densidad de flujo en el núcleo:

$$B = \frac{E_s \cdot 10^6}{4,44 \cdot f \cdot n_s \cdot S_{Fe}} = \frac{0.894 * 10^6}{4.44 * 60 * 40 * 376} = 0.223\text{T}$$

Intensidad del campo magnético:

$$H = \frac{B}{\mu_a} = \frac{0.223}{0.052} = 4.28\text{A/M}$$

Corriente de magnetización:

$$I_m = \frac{H \cdot l_m \cdot 10^{-3}}{n_p} = \frac{4.28 * 0.164 * 10^{-6}}{1} = 0.70\text{A}$$

Corriente debida a las pérdidas magnéticas referida al primario:

$$I_a = \frac{P_w}{E_s} = \frac{0.018}{0.89} = 0.020 * 40 = 0.83\text{A}$$

donde:  $P_w = \delta \cdot P = 0.04 * 0.456 = 0.018\text{W}$  y  $\delta = \frac{B}{\partial} = \frac{0.223}{5.5} = 0.04$

Corriente en vacío:

$$I_o = \sqrt{I_m^2 + I_a^2} = \sqrt{(0.70^2 + 0.82^2)} = 1.08\text{A}$$

Ángulo entre la corriente que consume el transformador en vacío ( $I_o$ ) y su componente activa ( $I_a$ ):

$$\varphi_o = 90^\circ - \text{Tan}^{-1} \frac{I_a}{I_m} = 90^\circ - \tan^{-1} \frac{0.82}{0.70} = 40.48$$

$$\psi_s = \tan^{-1} \left( \frac{X_c}{R_T} \right) = \tan^{-1} \frac{0.078}{0.127} = 31.55$$

Error de relación de intensidad:

$$f_I = \left[ 1 - \frac{n_s}{n_p \cdot K_{IN}} - \frac{I_o \cdot \cos(\varphi_o - \psi_s)}{I_s \cdot K_{IN}} \right] \times 100 = \left[ 1 - \frac{40}{1 \cdot 40} - \frac{1.08 \cdot \cos(40.48 - 31.55)}{6 \cdot 40} \right] \times 100 = \pm 0.444$$

Error de Fase de intensidad:

$$\delta_I = 3438 \cdot \frac{n_p \cdot I_o \cdot \sin(\varphi_o - \psi_s)}{n_s \cdot I_s} = 3438 \cdot \frac{1 \cdot 1.08 \cdot \sin(40.48 - 31.55)}{40 \cdot 6} = 2.40 \text{ min}$$

Resumiendo, para los casos 3 y 4, los resultados están dentro de los parámetros correspondientes a los errores de relación y de fase, para un 100% y 120% de su corriente nominal.

## 2.7 Consideraciones finales del capítulo

- En el procedimiento implementado se aplica un método iterativo, mediante el cual se trata de llegar a la solución esperada a partir de aproximaciones sucesivas.
- El procedimiento de recalcu del transformador se basa en, a partir de una estructura ferromagnética dada, determinar los valores que define su potencia de salida, corriente por los devanados y clase de precisión.

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### Conclusiones

A partir de los resultados obtenidos con este trabajo, se establecen las conclusiones siguientes:

- Para el procedimiento de diseño y recálculo de un transformador de intensidad de baja tensión con núcleo toroidal los pasos a seguir se pueden agrupar en varias etapas como sigue: características y especificaciones del núcleo, características del enrollado a utilizar por secundario, especificaciones de la carga y determinación de los errores de relación y de fase.
- El procedimiento de diseño es el mismo que el utilizado para el recálculo del transformador de intensidad, salvo que en este caso los parámetros de diseño sobre los que se debe actuar son las propiedades y dimensiones del núcleo, así como las dimensiones y número de vueltas del devanado secundario.
- Los resultados obtenidos a partir de la comparación entre los casos bajo estudio y el brindado por el fabricante son satisfactorios, obteniéndose errores de relación y de fase por debajo de los ofrecidos en las normas.

### Recomendaciones

Las recomendaciones de este trabajo son:

1. Continuar con el estudio de los transformadores de instrumentación, abordando los transformadores de tensión.
2. Proponer un procedimiento de diseño y recálculo para los transformadores de tensión.

**REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

- [1] H. S. M. DE PAZ, "TRANSFORMADORES DE CORRIENTE TC."
- [2] A. Quiroga, "Transformadores de Medida," p. 28, 2010.
- [3] J. F. Cadena Lemos, "Diseño y construcción de un transformador de corriente de uso industrial para medida en baja tensión," QUITO/EPN/1991, 1991.
- [4] B. A. Luciano, R. C. Freire, J. G. A. Lira, G. Fontgalland, and W. Castro, "Transformador de Corrente com Núcleo Toroidal de Liga Nanocristalina," *IEEE Latin American Transactions*, vol. 4, pp. 160-164, 2006.
- [5] J. h. argañaraz, "Instrumentación Transformadores de medida," 2003.
- [6] A. H. S.A, "Introducción a los Transformadores de Medida," 2004.
- [7] J. Berrosteguieta, *Introducción a los transformadores de medida*: Artech, 1992.
- [8] J. Gomez, X. Gutierrez, and J. Canal, "IEEE Latin America Transactions."
- [9] J. R. Vilorio, *Manual del electricista de taller: electrotenia general, esquemas*: Thomson-Paraninfo, 1988.
- [10] V. H. Yáñez Salazar, "Elaborar un manual de procedimientos para el diseño y construcción de transformadores," 2010.
- [11] G. Ordóñez Plata, "Mediciones electricas," 2013.

- [12] j. barrios, "mediciones eléctricas ".
- [13] B. A. Najle Ormazábal, "Transformadores de distribución con núcleo de metal amorfo: investigación y diseño teórico," 2013.
- [14] F.-y. LI, K. JI, and J.-k. ZANG, "DESIGN OF A PRACTICAL DSP BASED OPTO-ELECTRONIC CURRENT TRANSFORMER [J]," *Power System Technology*, vol. 6, p. 011, 2002.
- [15] A. P. L. C. DE MULTÍMETROS, P. C. DE GANCHO MONITOREADO, T. P. TÉCNICO, C. M. B. E. DEL CARMEN, C. V. R. RUBÍ, and I. M. G. CASTRO, "FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA ELÉCTRICA."
- [16] E. Alvear, "Diseño y Construcción de un Transformador de corriente para Laboratorio," Tesis de Grado, Escuela F£ litecnica Nacional, 1978.
- [17] G. C. Ayala, C. L. Macías, A. L. Ruelas, J. M. García, A. M. Enríquez, H. C. Meza, *et al.*, "Diseño de un prototipo didáctico para la implementaDiseño de un prototipo didáctico para la implementación de redes de sensores inalámbricos basados en el protocolo Zigbeección de redes de sensores inalámbricos basados en el protocolo Zigbee," *Ra Ximhai: revista científica de sociedad, cultura y desarrollo sostenible*, vol. 7, pp. 315-324, 2011.
- [18] P. Camarena, *Transformadores eléctricos industriales: reparación, diseño y construcción*: Compañía Editorial Continental, 1974.
- [19] R. Peño Moreno, "Análisis y diseño de transformadores de campo en guía de onda," 2010.
- [20] M. Kezunovic, L. Kojovic, A. Abur, C. Fromen, D. Sevcik, and F. Phillips, "Experimental evaluation of EMTP-based current transformer models for protective relay transient study," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 9, pp. 405-413, 1994.

- [21] D. C. Yu, J. C. Cummins, Z. Wang, H.-J. Yoon, and L. A. Kojovic, "Correction of current transformer distorted secondary currents due to saturation using artificial neural networks," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 16, pp. 189-194, 2001.