

**METODOLOGIA PARA LA IDENTIFICACIÓN DE TRANSFORMADORES DE
CORRIENTE SATURADOS EN UN SISTEMA DE POTENCIA**

SANTIAGO JOSE CAMPOS CHACON

**UNIVERSIDAD DEL VALLE
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA
PREGRADO EN INGENIERÍA ELÉCTRICA
SANTIAGO DE CALI
2015**

**METODOLOGIA PARA LA IDENTIFICACIÓN DE TRANSFORMADORES DE
CORRIENTE SATURADOS EN UN SISTEMA DE POTENCIA**

SANTIAGO JOSE CAMPOS CHACON

Documento Presentado Como Proyecto de Grado de Ingeniería Eléctrica

Directores:

**Gladys Caicedo Delgado
Ingeniera Electricista, Ph. D.**

**Fabián Fernando Díaz
Ingeniero Electricista, Ing.**

**UNIVERSIDAD DEL VALLE
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA
PREGRADO EN INGENIERÍA ELÉCTRICA
SANTIAGO DE CALI
2015**

DEDICATORIA

Le dedico este trabajo de grado, a mis padres José Julio Campos Galicia y Melida Esperanza Chacón Molina, por su incondicional apoyo en todo mi proceso de estudio y en mi diario vivir y porque siempre han creído en mí. A mis Hermanos Julián Alejandro Campos Chacón y Edwin Mauricio Campos Chacón, por estar siempre a mi lado apoyándome, protegiéndome y ayudándome en mi formación. A toda mi familia con quienes comparto todos los momentos especiales de la vida. A mis amigos incondicionales que siempre están en los buenos y en los difíciles momentos.

Muchas gracias, Dios los Bendiga.

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar le doy gracias a Dios, por ser mi guía espiritual y darme las bendiciones, para culminar esta etapa de mi vida. A mis Padres y Hermanos, por estar siempre a mi lado apoyándome y direccionando mis pasos y por inculcarme el amor por mi familia, los principios y valores para proseguir por la vida.

A la Directora del trabajo de grado, Gladys Caicedo, por haberme orientado a seleccionar y ser mi guía incondicional en el desarrollo de este trabajo y su feliz culminación. Al Ing. Fabián Fernando Díaz de EPSA por su colaboración y dedicación en este trabajo. A mis amigos Cesar López, David Gómez, Jaiber Peña, Calor Ordoñez, Cristian Sandoval, Camilo España y Jhon Gonzales, por su acompañamiento y colaboración. A mis profesores y compañeros de la Universidad del Valle por que contribuyeron a mi crecimiento académico y personal, y a todos quienes de una u otra forma han contribuido para este logro, Dios los bendiga a todos.

TABLA DE CONTENIDO

1	CAPITULO 1	17
1.1	Principio de funcionamiento de un transformador de corriente (TC).....	17
1.2	Circuito equivalente	18
1.3	Diagrama fasorial.....	19
1.4	Clasificación de los TC	20
1.4.1	Transformadores de medición.....	20
1.4.2	Transformadores de protección.....	20
1.4.3	Transformadores mixtos.....	20
1.4.4	Transformadores combinados.....	20
1.5	Características constructivas de los TC de protección para tensiones superiores a 13,2KV	21
1.5.1	Aislamiento externo.....	21
1.5.2	Aislamiento interno.....	21
1.5.3	Núcleo	21
1.5.4	Devanado primario	23
1.5.5	Devanados secundarios.....	23
1.5.6	Marca de bornes	23
1.5.7	Placa de características	24
1.6	Características de funcionamiento de los TC de protección	25
1.6.1	Corriente primaria nominal	25
1.6.2	Corriente secundaria nominal	25
1.6.3	Relación de transformación real.....	26
1.6.4	Relación de transformación nominal	26
1.6.5	Error de corriente ó error de relación	26
1.6.6	Error de fase	26
1.6.7	Potencia nominal.....	27
1.6.8	Corriente de límite térmico (<i>I_{th}</i>).....	27
1.6.9	Corriente de límite dinámico (<i>I_{dyn}</i>)	27
1.6.10	Corriente nominal térmica continua (<i>I_{th}</i>)	27

1.6.11	Error compuesto	28
1.6.12	Clase de precisión IEC.....	28
1.6.13	Clase de precisión ANSI/IEEE	29
1.7	Curva de excitación	30
1.7.1	Partes de la curva de excitación	30
2	CAPITULO2	32
2.1	Normas a utilizar	32
2.1.1	IEEE C37.110-2008	32
2.1.2	IEEE C57.13.1-2007	32
2.1.3	IEC 60044-1-1992	32
2.1.4	Característica de excitación secundaria del TC	33
2.1.5	Voltaje de saturación y Voltaje de codo ó rodilla	34
2.2	Saturación en los transformadores de corriente	35
2.2.1	Saturación AC.....	35
2.2.2	Saturación DC	35
2.2.3	Factor de Saturación	36
2.2.4	Criterios para evitar en gran medida la saturación	38
2.2.5	Tiempo de saturación.....	39
2.2.6	Aspectos que influyen en el tiempo de saturación	40
2.3	Efectos de la remanencia en el núcleo del TI	42
2.4	Precaución en pruebas de campo para transformadores de corriente	42
2.5	Prueba de excitación	43
3	CAPITULO 3	45
3.1	Parámetros de entrada requeridos	45
3.1.1	Parámetros asociados al modelo circuital del TC.....	46
3.1.2	Parámetros asociados a la curva de saturación del TC	50
3.1.3	Características del sistema de potencia en el punto donde está conectado el TC	53
3.2	Forma de onda de salida entregada por el software de cálculo.....	59
4	CAPITULO 4	61

4.1	TC conectado en un sistema de potencia anillado	62
4.1.1	Parámetros asociados al modelo circuital del TC.....	64
4.1.2	Parámetros asociados a la curva de saturación del TC	65
4.1.3	Parámetros asociados al sistema de potencia donde está conectado el TC	69
BIBLIOGRAFIA.....		80
ANEXOS.....		81

LISTA DE FIGURAS

<i>Figura 1.</i> Esquema de un TC ideal.	17
<i>Figura 2.</i> Circuito equivalente de un transformador de corriente.	18
<i>Figura 3.</i> Diagrama fasorial del TC con una carga ($FP=1$).....	19
<i>Figura 4.</i> Esquema y partes de un TC.	22
<i>Figura 5.</i> Curva de excitación típica de un TC.	30
<i>Figura 6.</i> Curva de excitación típica para un TC multi-relacion clase C.....	33
<i>Figura 7.</i> En TC no saturado. Corriente primaria vs flujo y corriente primaria vs corriente secundaria.	36
<i>Figura 8.</i> En TC saturado. Corriente primaria vs flujo y corriente primaria vs corriente secundaria.	36
<i>Figura 9.</i> Representación grafica del rendimiento del TI.....	37
<i>Figura 10.</i> Esquema de la prueba de excitación.	44
<i>Figura 11.</i> Diagrama de parámetros de entrada y salida.	45
<i>Figura 12.</i> Parámetros de entrada del software de cálculo.....	46
<i>Figura 13.</i> Modelo circuital del transformador.....	46
<i>Figura 14.</i> Esquema para medida de resistencia de devanado secundario.....	47
<i>Figura 15.</i> Esquema del circuito para el cálculo de resistencia de carga.....	48
<i>Figura 16.</i> Esquema para la prueba de medida de impedancia de carga.....	49
<i>Figura 17.</i> Como medir la pendiente de la curva de excitacion.	51
<i>Figura 18.</i> Voltajes de saturación para un TC multi-relacion clase C. [5].....	52
<i>Figura 19.</i> Remanencia del TC calculada a partir de la curva de excitación.....	53
<i>Figura 20.</i> Red de impedancias donde esta conectado un TC.	55
<i>Figura 21.</i> Corriente total de cortocircuito y sus dos componentes.....	57
<i>Figura 22.</i> En TC no saturado. Corriente primaria vs flujo y corriente primaria vs corriente secundaria.	58
<i>Figura 23.</i> En TC saturado. Corriente primaria vs flujo y corriente primaria vs corriente secundaria.	58
<i>Figura 24.</i> Onda secundaria no distorsionada real (negra) e ideal (azul) entregada por el TC.	59
<i>Figura 25.</i> Onda secundaria distorsionada real (negra) e ideal (azul) entregada por el TC.	60
<i>Figura 26.</i> Transformador de corriente ABB IMBD 145 A4	61
<i>Figura 27.</i> Diagrama de parámetros de entrada y salida.	62
<i>Figura 28.</i> Diagrama unifilar del sistema anillado en donde está conectado el TC.	63
<i>Figura 29.</i> Curva de saturación del TC ABB IMBD 145 A4.....	65

<i>Figura 30. Obtención del parámetro S a partir de la curva de excitación típica para un TC multi-relacion clase C</i>	<i>67</i>
<i>Figura 31. Remanencia del TC calculada a partir de la curva de excitación.....</i>	<i>69</i>
<i>Figura 32. Onda secundaria real (negra) e ideal (azul) entregada por el TC.....</i>	<i>70</i>
<i>Figura 33. Onda secundaria real (rojo) e ideal (azul) entregada por el TC.</i>	<i>71</i>
<i>Figura 34. Onda secundaria real (negra) e ideal (azul) con off = 0</i>	<i>72</i>
<i>Figura 35. Onda secundaria real (negra) e ideal (azul) con off = 0.2</i>	<i>73</i>
<i>Figura 36. Onda secundaria real (negra) e ideal (azul) con off = 0.4</i>	<i>73</i>
<i>Figura 37. Onda secundaria real (negra) e ideal (azul) con off = 0.5</i>	<i>73</i>
<i>Figura 38. Onda secundaria real (negra) e ideal (azul) con off = 0.6</i>	<i>74</i>
<i>Figura 39. Onda secundaria real (negra) e ideal (azul) con off = 0.7</i>	<i>74</i>
<i>Figura 40. Onda secundaria real (negra) e ideal (azul) con IP = 2500</i>	<i>75</i>
<i>Figura 41. Onda secundaria real (negra) e ideal (azul) con IP = 7500</i>	<i>75</i>
<i>Figura 42. Onda secundaria real (negra) e ideal (azul) con IP = 12500</i>	<i>76</i>
<i>Figura 43. Onda secundaria real (negra) e ideal (azul) con IP = 18000</i>	<i>76</i>
<i>Figura 44. Onda secundaria real (negra) e ideal (azul) con IP = 20000</i>	<i>76</i>
<i>Figura 45. Onda secundaria real (negra) e ideal (azul) con IP = 25000</i>	<i>77</i>
<i>Figura 46. Forma de onda de la corriente secundaria con S=15</i>	<i>86</i>
<i>Figura 47. Forma de onda de la corriente secundaria con S=15,3</i>	<i>86</i>
<i>Figura 48. Forma de onda de la corriente secundaria con S=15,6</i>	<i>86</i>
<i>Figura 49. Forma de onda de la corriente secundaria con S=15,9</i>	<i>86</i>
<i>Figura 50. Forma de onda de la corriente secundaria con S=16,2</i>	<i>87</i>
<i>Figura 51. Forma de onda de la corriente secundaria con S=16,5</i>	<i>87</i>
<i>Figura 52. Forma de onda de la corriente secundaria con S=16,8</i>	<i>87</i>
<i>Figura 53. Forma de onda de la corriente secundaria con S=17,1</i>	<i>87</i>
<i>Figura 54. Forma de onda de la corriente secundaria con S=17,4</i>	<i>88</i>
<i>Figura 55. Forma de onda de la corriente secundaria con S=17,7</i>	<i>88</i>
<i>Figura 56. Forma de onda de la corriente secundaria con S=18</i>	<i>88</i>
<i>Figura 57. Forma de onda de la corriente secundaria con S=18,3</i>	<i>88</i>
<i>Figura 58. Forma de onda de la corriente secundaria con S=18,6</i>	<i>89</i>
<i>Figura 59. Forma de onda de la corriente secundaria con S=18,9</i>	<i>89</i>
<i>Figura 60. Forma de onda de la corriente secundaria con S=19,2</i>	<i>89</i>
<i>Figura 61. Forma de onda de la corriente secundaria con S=19,5</i>	<i>89</i>
<i>Figura 62. Forma de onda de la corriente secundaria con S=19,8</i>	<i>90</i>
<i>Figura 63. Forma de onda de la corriente secundaria con S=20,1</i>	<i>90</i>
<i>Figura 64. Forma de onda de la corriente secundaria con S=20,4</i>	<i>90</i>
<i>Figura 65. Forma de onda de la corriente secundaria con S=20,7</i>	<i>90</i>
<i>Figura 66. Forma de onda de la corriente secundaria con S=21</i>	<i>91</i>
<i>Figura 67. Forma de onda de la corriente secundaria con S=21,3</i>	<i>91</i>

<i>Figura 68.</i> Forma de onda de la corriente secundaria con $S=21,6$	91
<i>Figura 69.</i> Forma de onda de la corriente secundaria con $S=21,9$	91
<i>Figura 70.</i> Forma de onda de la corriente secundaria con $S=22,2$	92
<i>Figura 71.</i> Forma de onda de la corriente secundaria con $S=22,5$	92
<i>Figura 72.</i> Forma de onda de la corriente secundaria con $S=22,8$	92
<i>Figura 73.</i> Forma de onda de la corriente secundaria con $S=23,1$	92
<i>Figura 74.</i> Forma de onda de la corriente secundaria con $S=23,4$	93
<i>Figura 75.</i> Forma de onda de la corriente secundaria con $S=23,7$	93
<i>Figura 76.</i> Forma de onda de la corriente secundaria con $S=24$	93
<i>Figura 77.</i> Forma de onda de la corriente secundaria con $S=24,3$	93
<i>Figura 78.</i> Forma de onda de la corriente secundaria con $S=24,6$	94
<i>Figura 79.</i> Forma de onda de la corriente secundaria con $S=24,9$	94
<i>Figura 80.</i> Forma de onda de la corriente secundaria con $S=25$	94
<i>Figura 81.</i> Foto de la obtención del parámetro S a partir de la curva de excitación típica para un TC multi-relacion clase C	95

LISTA DE TABLAS

<i>Tabla 1.</i> Esquema y marcaje de bornes.	24
<i>Tabla 2.</i> Factores de precisión IEC.....	28
<i>Tabla 3.</i> Parámetros proporcionados por EPSA.	63
<i>Tabla 4.</i> Datos análisis de sensibilidad con Ia constante	72
<i>Tabla 5.</i> Datos análisis de sensibilidad con IDC constante	75

LISTA DE ANEXOS

Anexo A. Curva de saturación con los puntos de medida.....	81
Anexo B. Catalogo: Equipos en Subestaciones-Distribución.....	82
Anexo C. Análisis de la influencia (S) sobre la forma de onda entregada por el TC.	86

RESUMEN

En este trabajo de grado se presenta una metodología para identificar transformadores de corriente saturados en un sistema de potencia. Se presenta el principio de funcionamiento, las características generales, la teoría y principio del fenómeno de la saturación de los transformadores de corriente para protección soportados por las normas internacionales vigentes IEC y ANSI/IEEE.

Se clasificaron los transformadores de intensidad de corriente, sus características constructivas y de funcionamiento, con propósito de protección en alta tensión. Así como también se presenta la característica de excitación o saturación detallada del núcleo de los TC, las distintas zonas de operación de un TC considerando las características dinámicas y el fenómeno de remanencia que se encuentra en el núcleo de los TC.

La metodología se realizó utilizando la herramienta de cálculo "*CT Saturation Theory and Calculator*" proporcionada por la "IEEE Power Systems Relaying Committee" la cual permitió la verificación de posible saturación al transformador de corriente que se le efectuó el análisis.

Palabras clave: Transformador de corriente, saturación, protección, característica de excitación, remanencia.

ABSTRACT

This final project for graduation presents a methodology to identify current transformers saturated in a power system. It also the principle of operation, general characteristics, the theory and the saturation's phenomenon principle of the protective current transformers supported by international standards of IEC and ANSI/IEEE.

The current transformers and the design features and working of the CT were classified for purpose of protection on high voltage. As well as it also presents the characteristic of excitation or saturation detail the core of the CT, the different areas of operation of a CT considering dynamic characteristics and the phenomenon of remanence that is at the core of the CT.

The methodology was performed using the calculation "CT Saturation Theory and Calculator" provided by the "IEEE Power Systems Relaying Committee" which allowed verification of possible saturation of the current transformer that the analysis was made.

Keywords: current transformer, saturation, protection, characteristic of excitation, remanence.

INTRODUCCIÓN

En los últimos años el País ha venido en crecimiento, una de las razones principales ha sido la celebración de tratados de libre comercio con otras naciones, y las interconexiones con Ecuador, Venezuela y próximamente con Panamá, lo que ha ocasionado el crecimiento de la demanda de energía y potencia. Esto ha ocasionado la expansión en el mediano y largo plazo del sistema interconectado nacional, lo que conlleva a aumentar la generación de energía con la construcción o repotenciación de centrales eléctricas y la construcción o repotenciación de subestaciones de transformación de energía y la construcción de nuevas redes de interconexión.

Según estudios de la proyección de la demanda de energía y potencia para el mediano y largo plazo (2015 – 2029) realizados por la Unidad de Planeación Minero Energética – UPME, el crecimiento promedio de la demanda proyectada cada cinco años en el periodo para la potencia es de 10,6% (10.279 MW en 2015 a 13.902 MW en 2029) y el crecimiento de la energía es de 14,2% (66.404 MWH en 2015 a 98.757 en 2019).

El sistema interconectado nacional es un sistema dinámico, puede operar de distintas maneras: los generadores pueden salir o no despachados en la bolsa, si salen despachados pueden tener muchas posibilidades de generación. Por otra parte la configuración de la red puede también tener muchas variaciones y la carga varía con la hora, el día y el mes.

Además los sistemas interconectados de potencia pueden verse afectados por la inadecuada actuación de los esquemas de protección, ya sea en el momento de presentarse fallas transitorias o por aumentos inesperados de carga que se reflejan en el aumento de los flujos de corriente, esto puede originar una mala actuación del sistema de protecciones, las cuales no actúan o actúan erróneamente al momento de presentarse alguna situación o evento anormal. Esto debido a que el dispositivo para censar la corriente (transformador de corriente) no es capaz de reflejar la corriente en el secundario donde se encuentran conectados los relés de protección cuando ocurre la saturación del material ferromagnético que lo compone.

Los transformadores de corriente, tanto de medida como de protección se construyen con núcleos de chapas magnéticas de gran permeabilidad. Cuando el núcleo del TC se va a utilizar para medición se utiliza una chapa de rápida

saturación, mientras que si se va a utilizar para protección el cual es el análisis de nuestro estudio se usan TC's con chapas magnéticas de gran permeabilidad y de lenta saturación lo cual garantiza para la protección que se mantenga la relación de transformación para valores de corriente por el lado de alta tensión de hasta 20 y 30 veces la nominal, lo que garantiza que en el lado de baja tensión se puedan obtener valores proporcionales a las corrientes de cortocircuito y sobrecarga para que puedan actuar los dispositivos de protección.

Al momento de presentarse corrientes mayores a 20 o hasta 30 veces el valor nominal, la chapa magnética del TC comienza a tener un grado de saturación muy elevado lo que presentaría un mal reflejo de la corriente (perdida de fidelidad) en el lado de baja corriente, lo que puede llevar a la no actuación de las protecciones.

Por esta razón se debe garantizar que los transformadores de corriente en un sistema de potencia actúen bajo las condiciones reales de diseño y poder prever cuando estas condiciones cambien, para tomar las medidas correctivas en forma oportuna y evitar que se presenten fallas en los sistemas protegidos o desabastecimientos de energía.

El objetivo general de este proyecto, es desarrollar una metodología que a partir de la obtención por pruebas de los parámetros propios del TC y del sistema de potencia permitan conocer la posible saturación de los transformadores de corriente de protección ubicados en cualquier punto de un sistema de potencia.

ESTRUCTURA DEL TRABAJO DE GRADO.

Este documento se divide en 4 capítulos descritos a continuación:

En el capítulo 1 se presentan la clasificación de los TC considerando las características de fabricación y funcionamiento.

En el capítulo 2 se presenta la característica de excitación o saturación de los TC considerando las características dinámicas y la remanencia del núcleo del TC.

En el capítulo 3 se presenta la caracterización de los parámetros necesarios para llevar a cabo la metodología de la identificación de la posible saturación de transformadores de corriente destinados para la función de protección.

En el capítulo 4 se presenta la implementación de la metodología sobre un TC conectado en un sistema de potencia real para la identificación de la posible saturación en esa aplicación en particular.

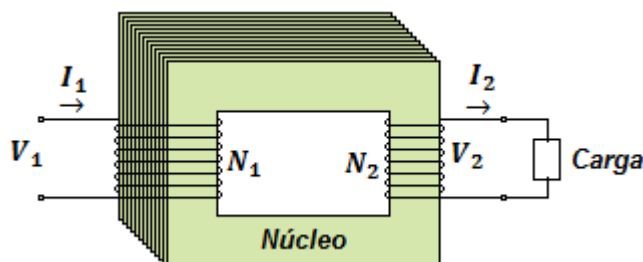
1 CAPITULO 1

En este capítulo se presenta la clasificación de los transformadores de corriente, teniendo en cuenta las características de fabricación y funcionamiento de los transformadores utilizados para protección. También se presentan algunas diferencias y similitudes entre los TC de protección y medida.

1.1 Principio de funcionamiento de un transformador de corriente (TC)

Los transformadores de corriente tienen como misión reducir la corriente de la red a valores tolerables por los instrumentos de medida o protección, el TC ideal consta de dos devanados (primario y secundario) y de un núcleo común como lo muestra la Figura 1. Al aplicar una tensión alterna V_1 al primario, circulara por él una corriente alterna I_1 , que producirá a su vez un flujo común alterno en el núcleo; la mayor parte de este flujo atraviesa el devanado secundario produciendo una corriente I_2 con una magnitud de acuerdo a la relación de transformación del TC según la ecuación (1).

Figura 1. Esquema de un TC ideal.



$$I_1 * N_1 = I_2 * N_2 \quad (1)$$

Esta ecuación nos da la relación de transformación en proporción al número de espiras en los devanados primario y secundario.

El devanado primario del transformador que tiene muy pocas espiras, 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 equipos de medida y protección que requieran ser energizados.

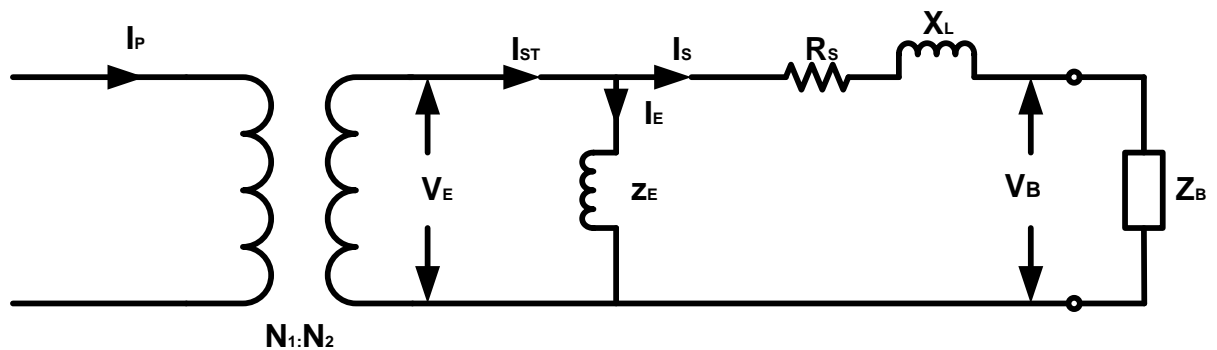
Se puede dar el caso de la existencia de varios devanados secundarios en un mismo transformador, cada uno teniendo su circuito magnético, un circuito se

puede utilizar para mediciones que requieren mayor precisión, y los demás se pueden utilizar para protección. De esta forma no existe influencia de un secundario sobre otro.

1.2 Circuito equivalente

La Figura 2 muestra el circuito equivalente simplificado de un transformador de corriente con carga conectada (System et al. 2008).

Figura 2. Circuito equivalente de un transformador de corriente.



Fuente: System, P. et al., 2008. IEEE Std C37.110'-2007, IEEE Guide for the Application of Current Transformers Used for Protective Relaying Purposes. , 2007(April).

Donde:

V_E	Voltaje de excitación secundario
V_B	Voltaje en bornes del TC
I_p	Corriente primaria
Z_E	Impedancia de excitación
I_{ST}	Corriente secundaria total
R_s	Resistencia secundaria
I_S	Corriente secundaria de carga
X_L	Reactancia de fuga
I_E	Corriente de excitación secundaria
$N_2:N_1$	Relación de transformación del TC
Z_B	Impedancia de carga

1.3 Diagrama fasorial.

La construcción del diagrama fasorial de un TC se hace de la siguiente manera (System et al. 2008):

- Comienza con la corriente de carga secundaria I_S .
- Dibujar la caída de voltaje secundario: $I_S * R_S$ y $I_S * X_L$.
- Añadir V_B a la tensión resultante a fin de obtener la tensión de excitación interna secundaria V_E .
- Cuando V_E se ha obtenido, dibujar el retraso de fasor de flujo V_E por 90° . La corriente de excitación I_E , se compone de la corriente de magnetización I_M , que es necesaria para generar el flujo en el núcleo del TC, y la corriente de pérdida I_{LOSS} , que es principalmente debido a la histéresis y pérdidas por corrientes parásitas.
- Dibujar la corriente de magnetización I_M , en cuadratura con la tensión y la corriente de pérdida I_{LOSS} , en fase con la tensión de excitación secundaria.

$$I_M + I_{LOSS} = I_E \quad (2)$$

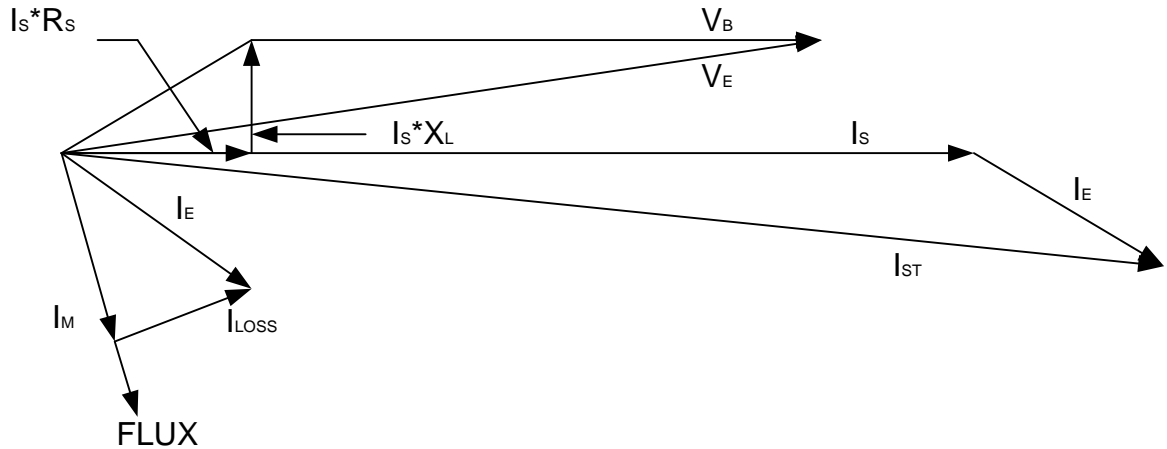
$$I_{ST} = I_S + I_E \quad (3)$$

Como se muestra en la siguiente ecuación (4), la corriente primaria es luego:

$$I_P = \left(\frac{N_2}{N_1} \right) (I_S + I_E) \quad (4)$$

Donde N_2/N_1 es la relación del TC.

Figura 3. Diagrama fasorial del TC con una carga (FP=1).



Fuente: System, P. et al., 2008. IEEE Std C37.110'-2007, IEEE Guide for the Application of Current Transformers Used for Protective Relaying Purposes. , 2007(April).

1.4 Clasificación de los TC

Los transformadores de corriente pueden ser de medición, protección, mixtos o combinados.

1.4.1 Transformadores de medición

Son los transformadores cuya función es medir las variables de corriente en un circuito. Estos equipos requieren que se garantice fielmente con precisión la magnitud y el ángulo de fase de la corriente. Se utilizan para alimentar los aparatos de medida, contadores y otros aparatos análogos. Estos equipos se construyen en su núcleo con chapas de gran permeabilidad y de rápida saturación.

1.4.2 Transformadores de protección

Son los transformadores cuya función es proteger un circuito y todos sus componentes, las líneas, los equipos de potencia, protección y medición, y las cargas asociadas al circuito. Estos equipos se construyen en su núcleo con chapas de gran permeabilidad y de lenta saturación.

1.4.3 Transformadores mixtos

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.

1.4.4 Transformadores combinados

Son aparatos que bajo una misma cuba albergan un transformador de corriente y otro de tensión. Se utilizan en estaciones de intemperie fundamentalmente para reducir espacios.

1.5 Características constructivas de los TC de protección para tensiones superiores a 13,2KV

Los transformadores de intensidad tanto de medida como de protección se construyen con núcleos de chapa magnética de gran permeabilidad, cuando el núcleo del TC se utiliza para protección se utilizan chapas de muy lenta saturación.

Componentes y descripción básica

La Figura 4 muestra el esquema de un TC marca ALSTOM, mostrando sus componentes.

1.5.1 Aislamiento externo

Es el que consta de una envolvente de cerámica con una línea de fuga lo suficientemente larga como para que ningún arco pueda saltar bajo condiciones de contaminación como lluvia, niebla, polvo etc.

1.5.2 Aislamiento interno

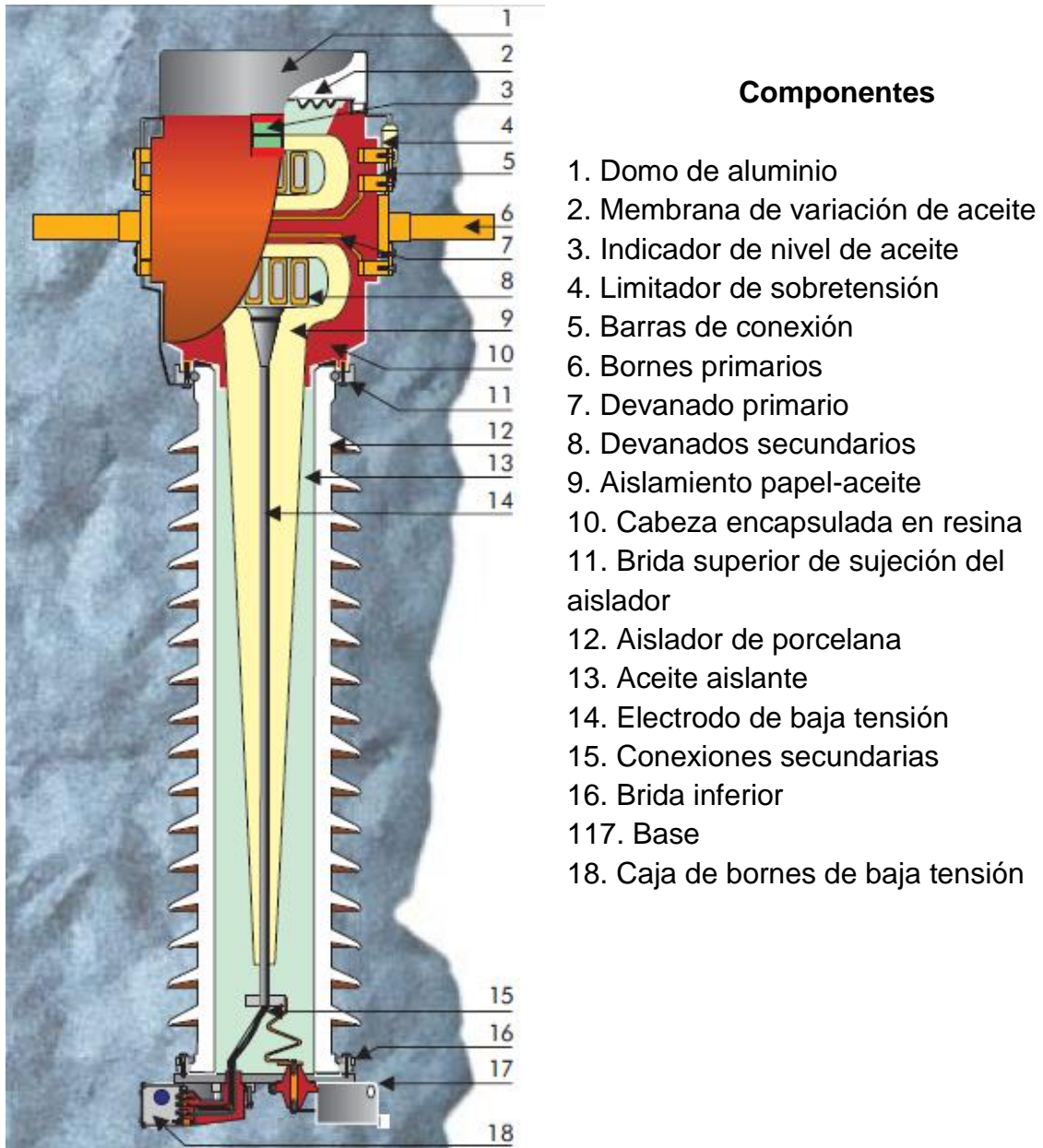
Puede variar según sus características constructivas. Un tipo de aislamiento es aquél en que las partes activas del transformador se moldean en resina epoxi que las fija, las separa y las aísla, existiendo una cámara de aire entre el aislamiento externo de porcelana y el cuerpo de resina; esta cámara se sella herméticamente con juntas de caucho nitrilo y se la rellena con aceite aislante o gas SF₆. Existe otro tipo constructivo de aislamiento para potencias de precisión elevadas y grandes corrientes de cortocircuito que está hecho de cartón prespán impregnado en aceite que aísla el conjunto de núcleos, arrollamientos secundarios y la bajante de los conductores que unen los arrollamientos secundarios con sus cajas de bornes.

1.5.3 Núcleo

Los transformadores de corriente, tanto de medida como de protección se construyen con núcleos de chapa magnética de gran permeabilidad. Se diferencian en que cuando el núcleo va destinado para un transformador de medida se utiliza una chapa de rápida saturación, mientras que si va destinado para protección, la chapa a utilizar será de lenta saturación. Los transformadores

para medida se construyen con chapas de gran permeabilidad y de rápida saturación, lo que garantiza una buena precisión para corrientes primarias no superiores al 120 % de la corriente primaria nominal. Mientras que las sobrecorrientes ocasionadas por cortocircuitos o sobrecargas no se transfieren al secundario gracias a la rápida saturación de la chapa magnética. De esta manera protegen los equipos de medida.

Figura 4. Esquema y partes de un TC.



Fuente: ALSTOM, Transformadores de corriente Serie QDR-ALSTOM

Por otra parte, los transformadores destinados para protección se construyen con chapas de gran permeabilidad y saturación débil o lenta, debido a que requieren que se garantice para la protección que se mantenga la relación de transformación para valores de corriente por el lado de alta tensión de hasta 20 y 30 veces el valor nominal, lo que garantiza que en el lado de baja tensión se puedan obtener valores proporcionales a las corrientes de cortocircuito y sobrecarga para que puedan actuar los dispositivos de protección.

1.5.4 Devanado primario

El devanado primario puede ser tipo barra o estar formado por conductores de aluminio o cobre. Existe la posibilidad de construir el devanado partido con acceso a los extremos de cada parte, esto para realizar conexiones en serie o paralelo de las partes del arrollamiento. Esto permite obtener diferentes relaciones de transformación.

1.5.5 Devanados secundarios

Los devanados secundarios están formados por hilos de cobre o aluminio uniformemente distribuidos alrededor del núcleo o si está conformado por núcleos de medición y protección, existe la posibilidad de cambio de relación de transformación a través de tomas secundarias. Son los devanados que alimentan directamente los circuitos de intensidad de los instrumentos de medida, contadores, y relés de protección.

1.5.6 Marca de bornes

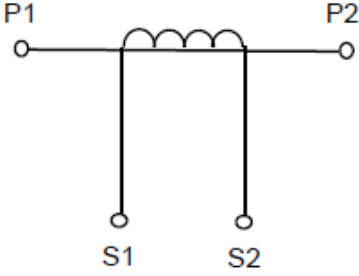
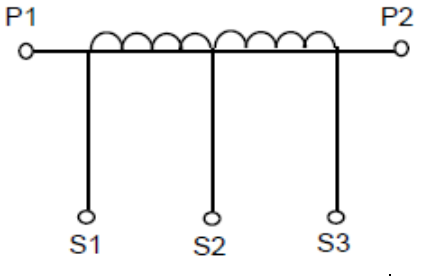
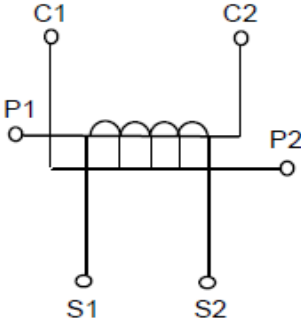
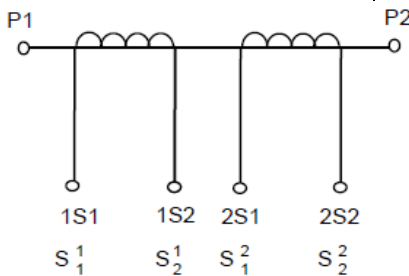
Los bornes de los transformadores de corriente utilizados para alta tensión se identifican en la placa de características (Kisan et al. 2003).

Las marcas de bornes identifican:

- a. Los devanados primario y secundario
- b. Las secciones de devanado, si existen
- c. Las polaridades relativas de los devanados y secciones de devanado
- d. las tomas intermedias, si existen

En la Tabla 1 se encuentran indicadas las marcas de los bornes de un transformador de corriente.

Tabla 1. Esquema y marcaje de bornes.

Bornes primarios		
Bornes secundarios	Transformador de simple relación	Transformador con toma intermedia en el secundario
Bornes primarios		
Bornes secundarios	Transformador con dos secciones en el devanado primario para la conexión en serie o paralelo	Transformador con dos devanados secundarios y núcleos independientes

Fuente: Kisan, M. et al., 2003. IEC std 60 044-1.

Todos los terminales marcados como P1, S1 y C1 tienen la misma polaridad en el mismo instante.

1.5.7 Placa de características

Todos los transformadores de corriente deben llevar al menos las siguientes marcas (Kisan et al. 2003).

- Nombre del constructor o cualquier otra marca que permita su fácil identificación.
- Número de serie y designación del tipo.
- Corrientes nominales primaria y secundaria en amperes.
- Frecuencia nominal en Hz.
- La potencia nominal y la clase de precisión correspondiente.
- La tensión más elevada para el equipo.
- El nivel de aislamiento nominal.

Toda la información deberá ser marcada de manera indeleble en el propio transformador o en una placa de características firmemente adherida al transformador. Además, deberá tener espacio disponible para la siguiente información.

- La corriente de límite térmico y la corriente de límite dinámico, si se diferencia de 2,5 veces la corriente de límite térmico.
- La clase de aislamiento, si es diferente de la clase A.
- En transformadores con dos devanados secundarios, el uso de cada devanado y sus terminales correspondientes.

1.6 Características de funcionamiento de los TC de protección

Las corrientes nominales primarias y secundarias nominales de funcionamiento de los TC están regidas por las normas nacionales (IRAM) o internacionales (IEC y ANSI).

1.6.1 Corriente primaria nominal

Es la corriente nominal de trabajo definida por las características de la carga para un régimen normal de funcionamiento. Los valores estándar de corrientes primarias nominales son: 10 - 12,5 - 15 - 20 - 25 - 30 - 40 - 50 - 60 - 75 A, y sus múltiplos o fracciones decimales (Kisan et al. 2003).

1.6.2 Corriente secundaria nominal

Es la corriente transformada y vista por los equipos de protección. Los valores estándar de corrientes secundarias nominales son de 1 A, 2 A y 5 A, pero el valor preferido es de 5 A (Kisan et al. 2003).

1.6.3 Relación de transformación real

Es el cociente entre la corriente primaria real y la corriente secundaria real (Kisan et al. 2003).

1.6.4 Relación de transformación nominal

Es el cociente entre la corriente primaria nominal y la corriente secundaria nominal (Kisan et al. 2003).

1.6.5 Error de corriente ó error de relación

Es el error que el transformador introduce en la medición de una corriente y que proviene del hecho que la relación real de transformación no es igual a la relación nominal de transformación (Kisan et al. 2003).

El error de corriente expresado en porcentaje viene dado por la ecuación (5):

$$\text{Error de corriente}(\%) = \frac{(K_n \cdot I_s - I_p) \cdot 100}{I_p} \quad (5)$$

Donde:

K_n Es la relación de transformación nominal.

I_p Es la corriente primaria real.

I_s Es la corriente secundaria real cuando I_p está fluyendo, en condiciones de medida.

1.6.6 Error de fase

Es la diferencia de fase entre los vectores de la corriente primaria y secundaria, con el sentido de los vectores elegido de forma que este ángulo sea cero para un transformador perfecto. El error de fase se considera positivo, cuando el vector de la corriente secundaria está en avance sobre el vector de la corriente primaria. Se expresa habitualmente en minutos o en centirradianes. (Esta definición es válida solo para corrientes senoidales).

1.6.7 Potencia nominal

Es la potencia aparente secundaria que a veces se expresa en volt-amperes (VA) y a veces en ohmios (Ω), bajo una corriente nominal determinada y que se indica en la placa de características del equipo. Para escoger la potencia nominal de un transformador, se suman las potencias de las bobinas de todos los aparatos conectados en serie con el devanado secundario, más las pérdidas por efecto joule que se producen en los cables de alimentación, y se selecciona el valor nominal inmediato superior (Kisan et al. 2003).

Los valores estándar de potencia nominal en VA son: 2,5 - 5,0 - 10 - 15 y 30VA.

1.6.8 Corriente de límite térmico (I_{th})

Es el mayor valor de corriente r.m.s primaria que el transformador puede soportar por efecto joule, durante un segundo, sin sufrir deterioro y con el circuito secundario en cortocircuito. Se expresa en kilo amperes eficaces o en múltiplos de la corriente nominal primaria (Kisan et al. 2003).

Los valores r.m.s estándar expresados en KA son: 6.3 - 8 - 10 - 12.5 - 16 - 20 - 25 - 31.5 - 40 - 50 - 63 - 80 y 100KA.

1.6.9 Corriente de límite dinámico (I_{dyn})

Es el valor pico de corriente primaria que un transformador puede soportar sin sufrir daños eléctricos o mecánicos por las fuerzas electromagnéticas resultantes, con el devanado secundario en cortocircuito (Kisan et al. 2003).

La corriente de límite dinámico según norma y frecuencia de la red son:

$$\text{IEC 50Hz} \quad I_{dyn} = 2.5 * I_{th}$$

$$\text{IEC 60 Hz} \quad I_{dyn} = 2.6 * I_{th}$$

$$\text{ANSI/IEEE 60 Hz} \quad I_{dyn} = 2.7 * I_{th}$$

1.6.10 Corriente nominal térmica continua (I_{th})

Es el valor de corriente que se puede permitir que fluya de forma continua por el devanado primario, con el devanado secundario conectado a carga nominal sin

que ocurra un aumento de temperatura superior al valore especificado para el TC (Kisan et al. 2003).

1.6.11 Error compuesto

En condiciones de estado estacionario es el valor r.m.s. de la diferencia entre, los valores instantáneos de la corriente primaria, y los valores instantáneos de la corriente secundaria real multiplicada por la relación de transformación nominal (Kisan et al. 2003).

El error compuesto ε_c , generalmente se expresa como un porcentaje del valor eficaz de los valores de la corriente primaria de acuerdo con la ecuación.

$$\varepsilon_c = \frac{100}{I_p} \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T (K_n \cdot i_s - i_p)^2 dt} \quad (6)$$

Donde:

K_n Es la relación de transformación nominal.

I_p Es el valor r.m.s. de la corriente primaria.

i_p Es el valor instantáneo de la corriente primaria.

i_s Es el valor instantáneo de la corriente secundaria.

T Es la duración de un ciclo o periodo.

1.6.12 Clase de precisión IEC

Tabla 2. Factores de precisión IEC.

Clase de precisión	Error de relación para la corriente primaria (%)	Desplazamiento de fase para la corriente primaria (minutos)	Error compuesto para la corriente limite de precisión primaria (%)
5P	± 1	± 60	5
10P	± 3	-	10

Fuente: Kisan, M. et al., 2003. IEC std 60 044-1.

Los factores que limitan la precisión estándar son: 5 - 10 - 15 - 20 - 30.

Para los transformadores de corriente de protección se considera el error compuesto definido anteriormente, el cual se define como el valor eficaz de la diferencia integrada en un periodo entre los valores instantáneos de la corriente

primaria y el producto de la relación de transformación nominal por los valores instantáneos de la corriente secundaria real. Este valor se expresa en porcentaje.

Por ejemplo, **10P30** significa que el transformador de protección presenta un error total compuesto del 10 por 100, a una corriente 30 veces mayor que la nominal (Kisan et al. 2003).

1.6.13 Clase de precisión ANSI/IEEE

La clase de precisión según la norma ANSI está determinada por dos símbolos (una letra y un voltaje nominal secundario), que describen el funcionamiento en estado estable del TC. El voltaje nominal en los terminales secundarios es el voltaje secundario que el TC entregará cuando se conecta a una carga secundaria nominal con 20 veces la corriente nominal secundaria, sin exceder un error de relación del 10%. Además, la corrección de relación debe estar limitada a 10% en cualquier corriente de 1 a 20 veces la corriente nominal secundaria a carga nominal o cualquier carga inferior. La tensión nominal dada se aplica sólo a la mayor relación de transformación del TC. Sin embargo, si se utiliza un cambiador de taps en un TC de varias relaciones, la capacidad de voltaje es directamente proporcional a la relación entre el valor del tap que se utiliza y la capacidad de bobinado completo, si los devanados están totalmente distribuidos alrededor del núcleo (System et al. 2008).

Por ejemplo, un TC de clase C100 significa que el error de relación no debe exceder el 10% para cualquier corriente de 1 a 20 veces la corriente secundaria nominal, si la carga no excede 1Ω . ($1\Omega * 20 * 5A = 100V$).

La mayoría de los TC utilizados para protección son de clase C o clase K.

La **clase C** indica que la relación de transformación puede ser calculada y que el flujo de dispersión es despreciable y la característica de excitación puede ser usada directamente para determinar el rendimiento del TC.

La **clase T** indica que la relación de transformación puede ser determinada por medio de pruebas. Esta clase tiene un efecto del flujo de dispersión y contribuye a un error de relación importante.

La **clase K** es la misma clase C, pero la tensión de saturación debe ser de al menos el 70% del voltaje secundario nominal.

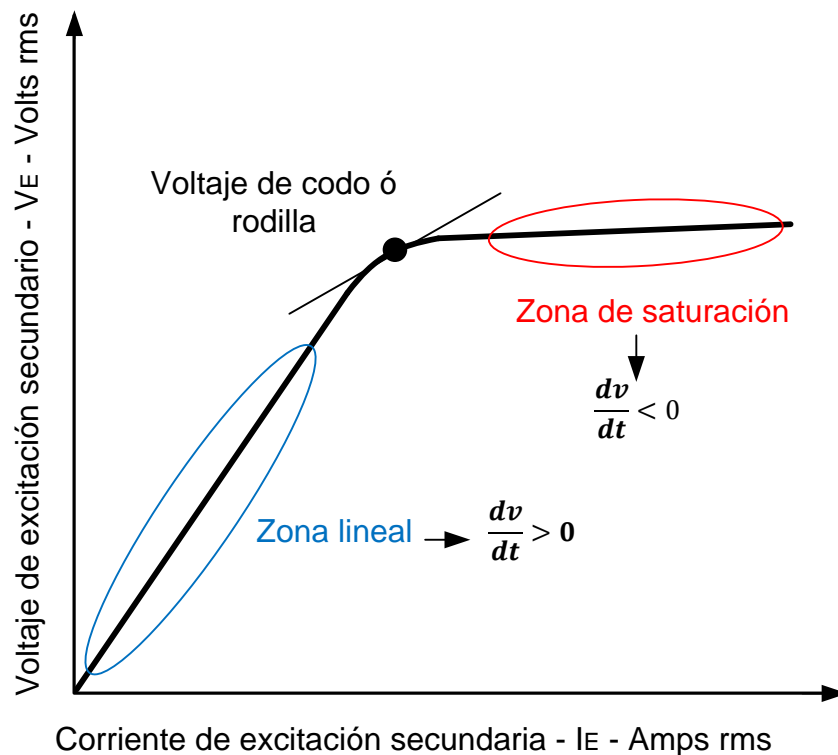
Las **clases ANSI H y L** son las más viejas y ya no se utilizan.

1.7 Curva de excitación

A continuación en la Figura 5 se presenta la forma de la curva de excitación de un TC que relaciona la corriente de excitación secundaria I_E (eje X) y el voltaje de excitación secundario V_E (eje Y), así como también los parámetros medidos y las 3 zonas de funcionamiento de un TC.

La saturación en los TC se presenta en el momento en que hay grandes corrientes de falla en el sistema, también se puede presentar debido a una mala selección, las características propias del núcleo que lo compone y los diferentes cambios que ocurren hoy en día en la red.

Figura 5. Curva de excitación típica de un TC.



1.7.1 Partes de la curva de excitación

Zona lineal: Es la parte lineal de la curva en la cual el TC trabaja normalmente, la corriente magnetizante es baja y la tensión aumenta de forma casi proporcional a

la corriente primaria, obteniendo valores reales de corriente en el lado secundario, sin que se presente un error en la relación de transformación.

Voltaje de codo ó rodilla: Es el punto de la curva donde existe un cambio en la naturaleza de $\left(\frac{dv}{dt}\right)$ debido al aumento de flujo en el material que compone el núcleo del TC, se encuentra en una zona intermedia entre la zona lineal y la zona de saturación, donde ocurre un cambio de signo de $\left(\frac{dv}{dt} > 0, a, \frac{dv}{dt} < 0\right)$. En materiales magnéticos como son los núcleos de los TC's se encuentra antes del punto donde empieza la saturación.

Zona de saturación: Es la zona en donde el núcleo del TC se encuentra parcial o totalmente saturado, la curva de excitación resulta casi horizontal presentando un error de relación excesivamente alto y la corriente secundaria se deforma debido a la saturación.

2 CAPITULO2

Este capítulo presenta la característica de excitación o saturación de los transformadores de intensidad de corriente, considerando las características de saturación y la remanencia del núcleo. Para esto se utilizan las normas internacionales vigentes de aplicación y pruebas de transformadores de corriente: IEEE C37.110-2007, IEEE C57.13.1-2006, IEC 44-6-1992.

A continuación se presenta cada una de las normas.

2.1 Normas a utilizar

2.1.1 IEEE C37.110-2008

Esta guía IEEE aplica a transformadores de corriente utilizados con fines de protección. Esta norma describe las características, la clasificación y la puesta en operación de los transformadores de corriente (TC) que se utilizan para protección. También se describen las condiciones que originan que la señal de salida del TC pueda ser distorsionada y los efectos que hace esta distorsión sobre los sistemas de potencia. Además se aborda la selección y aplicación de los TC para los sistemas de protección más comunes (System et al. 2008).

2.1.2 IEEE C57.13.1-2007

Esta guía IEEE presenta las pruebas de campo realizadas para probar los transformadores de corriente. El propósito de esta guía es considerar las precauciones que se deben de tener antes de realizar las pruebas y describir los métodos de pruebas de campo que aseguren que los transformadores de corriente van a funcionar correctamente. Estas pruebas son: las pruebas de relación, polaridad, excitación, admitancia, carga, resistencia de aislamiento y resistencia de devanados; las cuales entregan información y nos garantizan que el TC está en buenas condiciones antes y después de estar en funcionamiento y cumplir un período de servicio (Systems et al. 2007).

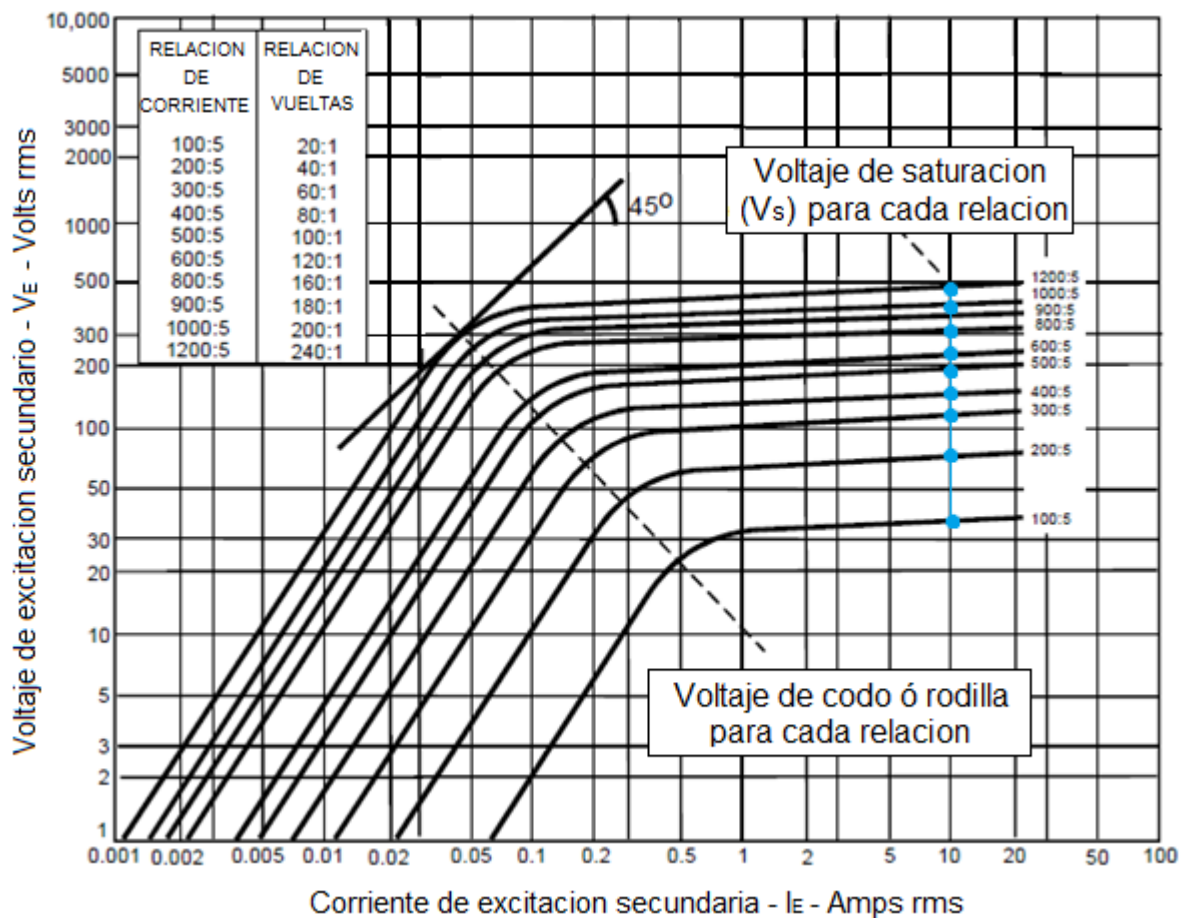
2.1.3 IEC 60044-1-1992

Esta parte de la norma IEC 44 se aplica a los transformadores de corriente de nueva fabricación, para su uso con instrumentos de medición eléctricos y dispositivos de protección eléctrica a frecuencias de 15 Hz a 100 Hz (Kisan et al. 2003).

2.1.4 Característica de excitación secundaria del TC

De acuerdo al numeral 1.7 donde se muestra la curva de excitación básica de un TC, a continuación se presenta una explicación más detallada de la característica de excitación con ayuda de un conjunto típico de curvas de excitación reales de un TC multi-relacion clase C como se muestra en la Figura 6.

Figura 6. Curva de excitación típica para un TC multi-relacion clase C.



Fuente: System, P. et al., 2008. IEEE Std C37.110'-2007, IEEE Guide for the Application of Current Transformers Used for Protective Relaying Purposes. , 2007(April).

La operación del TC se ilustra mediante el uso de curvas de excitación. Estas curvas muestran la relación entre la tensión de excitación secundaria (V_E) y la corriente de excitación secundaria (I_E).

Cuando el voltaje desarrollado a través de la carga del TC es bajo, la corriente de excitación es baja y la forma de onda de la corriente secundaria no tendrá una distorsión apreciable; cuando el voltaje a través del devanado secundario del TC aumenta, ya sea porque la corriente o la carga se incrementan, el flujo en el núcleo del TC también aumentará y finalmente el TC operará en la región donde hay un aumento desproporcionado de la corriente de excitación; el núcleo del TC está entrando en la región magnéticamente saturada; una operación más allá de este punto resulta en un incremento en el error de relación y una forma de onda de corriente secundaria distorsionada.

2.1.5 Voltaje de saturación y Voltaje de codo ó rodilla

El voltaje de saturación V_S es el voltaje simétrico a través del devanado secundario del TC para el cual el pico de inducción excede la densidad de flujo de saturación. La corriente secundaria entregada por el TC a un esquema de protección es siempre menor que la corriente nominal del TC. La relación de corriente (IP/RCT), es reducida por la corriente de excitación I_E para producir la corriente I_S . Donde IP es la corriente primaria y RCT es la relación de transformación del TC (System et al. 2008).

Ya que las ondas de corrientes de falla necesariamente comienzan con algún grado de desplazamiento (offset DC), una correcta práctica de diseño requiere que el error de relación permanezca debajo de 10% durante el periodo offset transitorio inicial, si es posible, particularmente cuando se necesita un disparo rápido.

El voltaje de codo o rodilla en la curva de excitación de un TC con un núcleo sin agujeros es el punto de máxima permeabilidad en la curva de excitación, trazada en escala logarítmica, donde la tangente a la curva hace un ángulo de 45° con el eje de abscisas. Esto se muestra en la anterior Figura 6 y da un voltaje de codo para una relación de 1200/5 A de aproximadamente 300 V. Cuando el TC tiene un núcleo con agujeros, el voltaje de codo es el punto donde la tangente a la curva forma un ángulo de 30° con el eje de abscisas (System et al. 2008).

Otra definición utilizada en la norma es que voltaje de codo está situado en un punto de la curva, donde un aumento del 10% en la tensión secundaria causa un aumento del 50% en la corriente secundaria. (System et al. 2008).

2.2 Saturación en los transformadores de corriente

La saturación magnética es el efecto que se observa en algunos materiales magnéticos, y se caracteriza como el estado alcanzado cuando cualquier incremento posterior en el campo de magnetización externo, no provoca un aumento en la magnetización del material del que se compone.

2.2.1 Saturación AC.

Los errores de los TC resultan de la corriente de excitación. Con el fin de comprobar si un TC funciona correctamente, es esencial medir o calcular la curva de excitación. La corriente de magnetización de un TC depende de la sección y longitud del circuito magnético, del número de vueltas del devanado y de las características magnéticas del material.

Del modelo circuital equivalente del TC se puede concluir que, cuando la corriente primaria se incrementa al igual que la corriente secundaria, estas corrientes alcanzan un punto (voltaje de codo ó rodilla) donde el núcleo comienza a saturarse y la corriente de magnetización llega a ser lo suficientemente alta para producir un error excesivo (Ramírez 2005).

2.2.2 Saturación DC

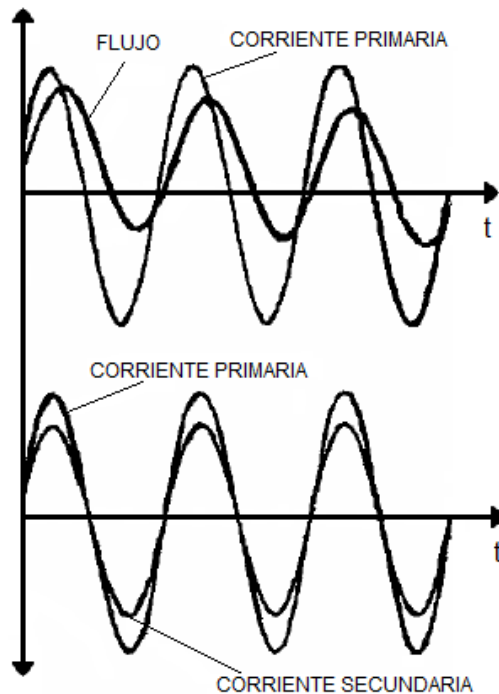
El comportamiento de un TC se ha discutido en términos de estado estable sin considerar la componente transitoria DC de la corriente de falla, el cual consiste en un voltaje continuo (llamado voltaje de offset o desplazamiento offset) que se suma a la componente de señal sinusoidal. Sin embargo, la componente DC puede tener más influencia en la producción de una saturación severa que la componente AC.

La componente DC de una corriente asimétrica aumenta en gran medida el flujo en el TC. Cuando el desplazamiento offset es máximo, el flujo del TC puede aumentar potencialmente a $1 + X / R$ veces el flujo resultante de la sinusoidal o de la componente no-offset, donde X y R son la reactancia del sistema primario y la resistencia hasta el punto de la falla respectivamente (System et al. 2008).

La diferencia entre el flujo con desplazamiento offset y no-offset se ilustra en la Figura 7 y la Figura 8.

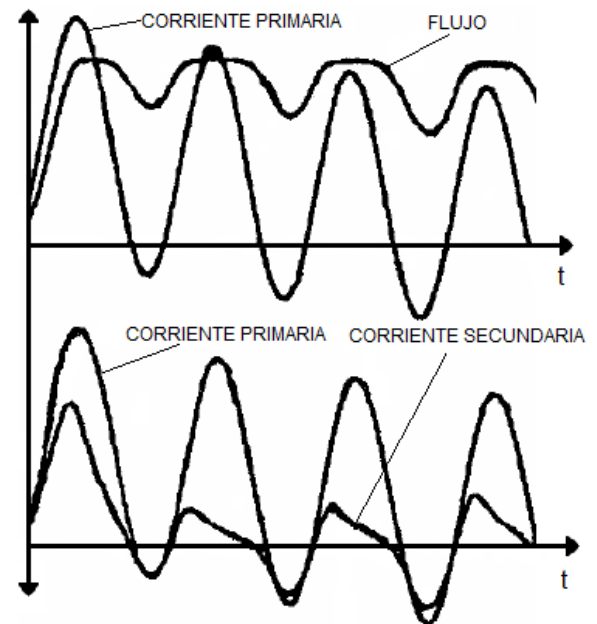
En la corriente primaria de la Figura 7 se encuentra el flujo remanente, pero no el flujo offset y el núcleo del TC no entra en la región saturada de operación; entonces la corriente secundaria no es distorsionada. La Figura 8 muestra el flujo resultante y la corriente secundaria cuando la corriente primaria está totalmente desplazada (offset), debido a la componente transitoria DC de la falla. El incremento en el flujo no es instantáneo, indicando que la saturación no ocurre instantáneamente pero si toma un tiempo, este tiempo es llamado tiempo de saturación.

Figura 7. En TC no saturado. Corriente primaria vs flujo y corriente primaria vs corriente secundaria.



Fuente: System, P. et al., 2008. IEEE Std C37.110'-2007, IEEE Guide for the Application of Current Transformers Used for Protective Relaying Purposes. , 2007(April).

Figura 8. En TC saturado. Corriente primaria vs flujo y corriente primaria vs corriente secundaria.



Fuente: System, P. et al., 2008. IEEE Std C37.110'-2007, IEEE Guide for the Application of Current Transformers Used for Protective Relaying Purposes. , 2007(April).

2.2.3 Factor de Saturación

Es la relación entre el voltaje de saturación y el voltaje de excitación de un transformador de corriente. El factor de saturación es un índice de proximidad a la saturación en un transformador de corriente.

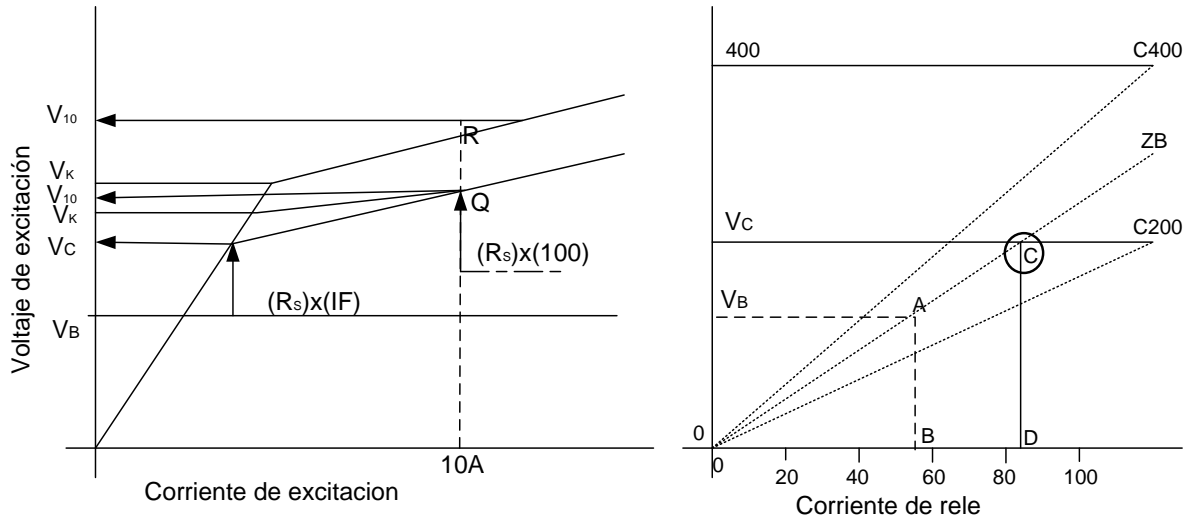
2.2.3.1 Factor de saturación determinado por la clasificación ANSI C

En la Figura 9, el voltaje en bornes del TC aumenta linealmente con la corriente secundaria a lo largo de la línea $V = Z_B * I$, donde Z_B es la carga total asociada al devanado secundario del TC. Para la máxima corriente de falla corresponde un voltaje en bornes V_B . Este voltaje es más pequeño que el voltaje máximo V_C que un TC clase C200 puede soportar según la Figura 9. La saturación ocurrirá (si el error de relación excede el 10%) si la corriente del secundario en el momento de falla excede la corriente máxima en el secundario que el TC puede soportar, donde el correspondiente grado de saturación en bornes con el factor de voltaje de saturación cruza el límite de la clase de precisión, V_C (punto C en la Figura 9). Se puede definir una medida del grado de saturación con el factor de saturación como muestra la ecuación (7) (System et al. 2008).

$$FS = \frac{VT}{VC} \quad (7)$$

Donde VT es el voltaje en bornes secundario y VC es el máximo voltaje en bornes que el TC puede soportar con una corriente de excitación de 10A y una corriente secundaria de 100A. Esta primera determinación de la saturación relaciona el voltaje en bornes y la clase de precisión del TC (clase efectiva en caso de un TC multi-relacion). Es fácil y práctico el cálculo, ya que requiere sólo datos disponibles. Una aplicación se considera razonablemente segura cuando el $FS < 0,5$.

Figura 9. Representación grafica del rendimiento del TI.



Fuente: System, P. et al., 2008. IEEE Std C37.110'-2007, IEEE Guide for the Application of Current Transformers Used for Protective Relaying Purposes. , 2007(April).

2.2.3.2 Factor de saturación determinado con la curva de excitación

El factor de saturación dado en la ecuación (7) es confiable por que asume el peor error de relación. Corresponde a un voltaje de excitación en la curva pasando por el punto Q en la Figura 9, en el cual la corriente de excitación es 10 A (el error máximo permitido por la definición de la clase de precisión). El término $R_s * 100$ representa la caída de tensión en la resistencia interna del TI.

Un nuevo factor de saturación puede ser determinado en la curva de excitación, como lo muestra la ecuación (8).

$$FS' = \frac{V_e}{V_{10'}} \quad (8)$$

Donde: V_e es el voltaje de excitación interno ($VT + R_s * IF$) a la máxima corriente de falla y $V_{10'}$ es el voltaje de la curva pasando por el punto Q, cuando la corriente de excitación es 10 A. Este voltaje está prácticamente cerca del punto de inflexión de voltaje VK' .

Dado que la capacidad de voltaje de excitación del TC debería ser más alto (que pasa a través del punto R en la Figura 9), el factor de saturación definido sobre la curva de excitación es menor, es decir, más favorable.

Estas dos definiciones demuestran que el factor de saturación determinado por la clasificación ANSI C es más fácil de aplicar y puede producir mejores resultados en los casos en que la resistencia interna del TI es significativa. El método de la curva de excitación requiere más datos y ofrece resultados más precisos y se debe utilizar cuando el FS es marginal (System et al. 2008).

2.2.4 Criterios para evitar en gran medida la saturación

Los efectos de saturación se pueden evitar en gran medida teniendo muy en cuenta el dimensionamiento del TC para así tener un voltaje de saturación por encima del requerido para la máxima corriente de falla y carga secundaria esperada con una asignación adecuada de las posibles componentes de DC y de remanencia. La tensión de saturación puede ser de 50% a 75% de la tensión nominal de la clase de precisión estándar del TC. (Por ejemplo en un TC clase C400). La saturación puede ser evitada mediante las siguientes observaciones:

- a) Para evitar la saturación AC, el TC debe tener un voltaje de saturación secundario, V_S , dado por la ecuación (9):

$$V_S > I_s * Z_s \quad (9)$$

- b) Para evitar la saturación por componentes de corriente continua (DC) en la onda primaria y con una carga puramente resistiva, el voltaje de saturación requerido está dado en la Ecuación (10):

$$V_S > I_s * Z_s \left(1 + \frac{X}{R}\right) \quad (10)$$

Si la carga del TC es también inductiva, el voltaje de saturación requerido para evitar la saturación causada por componentes DC primarias, está dado en la Ecuación (11):

$$V_S > I_s * Z_s * \left(1 + \frac{X}{R}\right) * \left(\frac{R_S + R_B}{Z_S}\right) \quad (11)$$

Si se presenta también posible pre magnetización, se utiliza la ecuación (12):

$$V_S > \frac{I_s * Z_s * \left(1 + \frac{X}{R}\right) * \left(\frac{R_S + R_B}{Z_S}\right)}{1 - \text{remanencia en pu}} \quad (12)$$

Donde:

- I_s Es la corriente de carga secundaria.
- Z_s Es la carga total secundaria ($R_s + X_L * Z_B$).
- R_s Es la resistencia secundaria
- X_L Es la reactancia de fuga
- Z_B Es la impedancia de carga
- X Es la reactancia primaria
- R Es la resistencia hasta el punto de falla

Estos requisitos generalmente resultan imprácticos para grandes TC, y por lo tanto se deben tomar medidas de compensación para minimizar los efectos de saturación en los esquemas de protección. Algunos relés instantáneos de alta velocidad pueden operar antes de la saturación (System et al. 2008).

2.2.5 Tiempo de saturación

El tiempo estimado que lleva a la saturación se puede calcular de acuerdo a las ecuaciones (13) y (14) (System et al. 2008).

$$T_s = -T_1 \ln \left[1 - \frac{K_s - 1}{\frac{X}{R}} \right] \quad (13)$$

$$T_1 = \frac{X}{\omega R} \quad (14)$$

Donde

\ln Es la función logaritmo natural

T_s Es el tiempo de saturación

T_1 Es el tiempo constante del sistema primario

K_s Es el factor de saturación V_s/V_B , donde V_s es el voltaje de saturación y $V_B = I_s(R_s + R_B)$

ω Es $2\pi f$, donde f es la frecuencia del sistema

X Es la reactancia del sistema primario al punto de falla

R Es la resistencia primaria al punto de falla

2.2.6 Aspectos que influyen en el tiempo de saturación

El tiempo de saturación es importante en el diseño y aplicación de relés de protección. Un TC es capaz de replicar con precisión corrientes primarias de corrección para uno o dos ciclos antes de que el núcleo del TC comience a funcionar en su región saturada. El tiempo de saturación de un TC está determinado por los siguientes parámetros.

Los numerales a) al f) se aplican en la elección de la mejor relación de un TC multi-relacion. Al especificar los TC se debe tener en cuenta que un fabricante puede utilizar un núcleo más pequeño para una relación más alta y cumplir con el mismo requisito de la clase de precisión, ya que las clases de precisión se especifican en términos de voltaje, no de flujo. Con un núcleo más pequeño, el TC tiene una mayor tendencia a saturarse; para evitar esto, el TC puede ser especificado con una clase de precisión más alta (System et al. 2008).

- a) **Grado de offset presente en la corriente de falla:** La relación X/R y el ángulo de incidencia de falla determinan el grado de desplazamiento (offset) en la forma de onda de la corriente primaria. La componente de corriente continua (DC) contribuye a un aumento de flujo; cuanto mayor sea el grado de offset, más rápido el núcleo alcanzará el inicio de la saturación.

- b) **Magnitud de corriente de falla:** La magnitud de la corriente de desplazamiento (offset) es proporcional a la magnitud de la componente de corriente sinusoidal. Cuanto mayor es la magnitud, más rápido será el incremento en el flujo hasta el punto de saturación.
- c) **Flujo remanente en el núcleo del TC:** El flujo remanente en el núcleo del TC se sumará o se restará al flujo producido en el núcleo por la variación de la intensidad y sentido de la corriente alterna, en función de sus polaridades relativas. Cuando el flujo remanente aumenta, el tiempo de saturación se acorta. En casos de flujo remanente muy grande, el TC puede saturarse casi desde el principio.
- d) **Impedancia secundaria:** Al aumentar la carga total secundaria de un TC manteniendo su factor de potencia, el tiempo de saturación se acorta. Esto es debido a que una carga mayor necesitara un voltaje más alto y como el flujo es proporcional al voltaje, el flujo en el núcleo aumentara en igual medida a la tensión teniendo como consecuencia una saturación más rápida. Para dos impedancias de la misma magnitud, la que tiene la componente más inductiva (FP bajo) dará un tiempo de saturación más grande porque la inductancia tiene una baja impedancia a la corriente de DC offset, reduciendo la caída de tensión de la carga y el flujo asociado. Una segunda característica de las cargas inductivas es su tendencia a saturarse a altas corrientes secundarias. El efecto es reducir la caída de tensión de la carga, lo que reduce el flujo y aumenta el tiempo de saturación. Cuando se añade una carga inductiva al circuito del TC, la magnitud de la carga óhmica general no se incrementa considerablemente (incluso si la saturación de la carga no se tiene en cuenta) porque las impedancias son añadidas como vectores en lugar de como escalares.
- e) **voltaje de saturación:** La impedancia de excitación secundaria de un TC depende de la cantidad y calidad del hierro en el núcleo. Cuanto mayor sea la sección transversal del núcleo del TC, se requiere mayor flujo para saturarlo. Esto resulta en un voltaje de saturación superior y el tiempo de saturación será más largo.
- f) **Relación de transformación:** La medida fundamental de la saturación de un TC es el grado en que la densidad de flujo excede el nivel de densidad de flujo de saturación. Para un área dada de núcleo y corriente primaria, el aumento de la relación de vueltas disminuye el flujo y, por lo tanto, disminuye la densidad de flujo. La reducción en el flujo se puede visualizar como el resultado de dos efectos.
- En primer lugar, ya que $E = n d\phi/dt$, un aumento de las vueltas reduce la cantidad de flujo necesario para producir una fuerza electromotriz (FEM). Dicho

de otro modo, la saturación se produce a una tensión proporcionalmente mayor cuando se aumenta el número de espiras del secundario.

En segundo lugar, un aumento de las vueltas reduce la corriente secundaria para una corriente primaria dada, ya que la corriente secundaria varía inversamente con la relación de vueltas. Si la carga óhmica secundaria se mantuviera constante, la tensión secundaria también varía inversamente con la relación de vueltas. En la práctica, la carga óhmica del circuito secundario aumenta en cierta medida, si se aumenta la relación del TC.

2.3 Efectos de la remanencia en el núcleo del TI

La remanencia magnética o magnetización remanente es la capacidad de un material para retener el magnetismo que le ha sido inducido, es decir, la magnetización que persiste en un imán permanente después de que se retira el campo magnético externo (Wikipedia 2014).

El flujo remanente en el núcleo de un TC depende del flujo que circula en el núcleo, inmediatamente antes de la interrupción de corriente primaria. La magnitud del flujo se determina del valor de la corriente primaria simétrica, el desplazamiento DC (offset), y la impedancia del circuito secundario. Se obtiene flujo máximo remanente, cuando la corriente primaria se interrumpe en el momento que el transformador está en estado saturado. Además, las pruebas que requieran que fluya corriente continua en los devanados del transformador causarán remanencia en el núcleo.

Una vez establecido el flujo remanente en un TC, se disipa muy poco en condiciones de servicio. Un voltaje aproximadamente del 60% de la tensión de saturación se debe aplicar, para reducir la remanencia a menos del 10% de la densidad de flujo de saturación (System et al. 2008).

2.4 Precaución en pruebas de campo para transformadores de corriente

Es importante tener en cuenta la desmagnetización del núcleo del transformador de corriente, antes de realizar cualquier prueba que requiera mediciones de variables eléctricas, y si existe alguna razón para sospechar que el TC ha sido sometido recientemente a altas corrientes, involucrando grandes componentes de DC, se debe desmagnetizar el núcleo del TC para que los resultados de las pruebas sean los esperados.

Un método usado para desmagnetizar los TC's es aplicando una señal adecuada de voltaje AC en el devanado secundario del TC, con una magnitud inicial suficiente para forzar su densidad de flujo por encima del punto de saturación y luego disminuir el voltaje aplicado lenta y continuamente hasta cero. Las conexiones de prueba utilizadas para este método de desmagnetización son idénticas a las requeridas para la prueba de excitación, como lo muestra la Figura 10.

Otro método utilizado para desmagnetizar un TC, es variando gradualmente la resistencia del secundario de menor a mayor con una variación constante. La magnitud de resistencia secundaria se determinara por la resistencia requerida para llevar el TC más allá del punto de inflexión de voltaje sobre la curva de excitación. Esta es típicamente una resistencia que causara una reducción de 65% a 75% en la corriente del circuito secundario.

Como un ejemplo, proporcionar al TC bajo prueba que produzca por lo menos 2.5 A de corriente de devanado secundario, una resistencia en serie se varia gradualmente de 0,1 Ω a 8 Ω y de nuevo a 0,1 Ω a un rango constante. Esta operación sobrecarga el TI y desmagnetiza el núcleo. Cuando se desmagnetiza un TC con menos de 2.5 A de corriente secundaria, una resistencia mayor de 50 Ω puede ser requerida.

Hay que tener mucho cuidado cuando se desmagnetiza el núcleo de un TC por que la tensión desarrollada en los terminales es de gran magnitud y puede que llegue al límite permitido en el secundario (System et al. 2008).

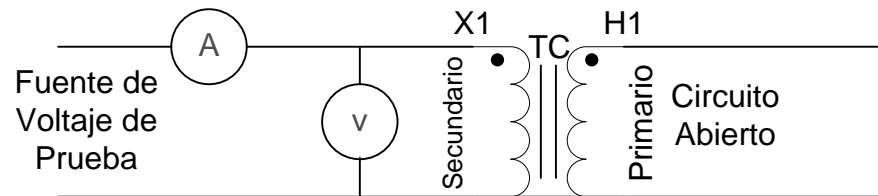
2.5 Prueba de excitación

Los procedimientos para realizar la prueba de excitación se definen en la norma IEEE Std C57.13.1-2007. Esta prueba puede hacerse en TC's clase C y T, lo que permite la comparación con los datos publicados en las normas o datos medidos previamente para determinar si se han producido desviaciones. Una tensión AC de prueba se aplica al devanado secundario del TC, mientras que el devanado primario se deja en circuito abierto, como se muestra en la Figura 10. Es fundamental desmagnetizar el TC antes de realizar esta prueba.

El voltaje aplicado al devanado secundario del TC es variado, y la corriente que fluye en el devanado en cada valor seleccionado de tensión se registra. Lecturas cerca al voltaje de codo de la curva de excitación, son especialmente importantes

en el trazado de una curva de comparación. Para TC con taps, el tap debe ser seleccionado para asegurar que el TC se sature con el equipo de prueba disponible.

Figura 10. Esquema de la prueba de excitación.



Fuente: Systems, P. et al., 2007. *IEEE Guide for Field Testing of Relaying*, (February).

La selección de los instrumentos de medida es especialmente importante para esta prueba. El amperímetro debe ser un instrumento de valor eficaz y el voltímetro debe ser un voltímetro de lectura promedio. Este voltímetro de respuesta promedio hará que el voltaje dependa menos de los armónicos causados por la impedancia del devanado no lineal siendo conectado a una fuente de impedancia infinita. Puede ser análogo o digital. El ancho de banda del instrumento debe extenderse por lo menos hasta el tercer armónico.

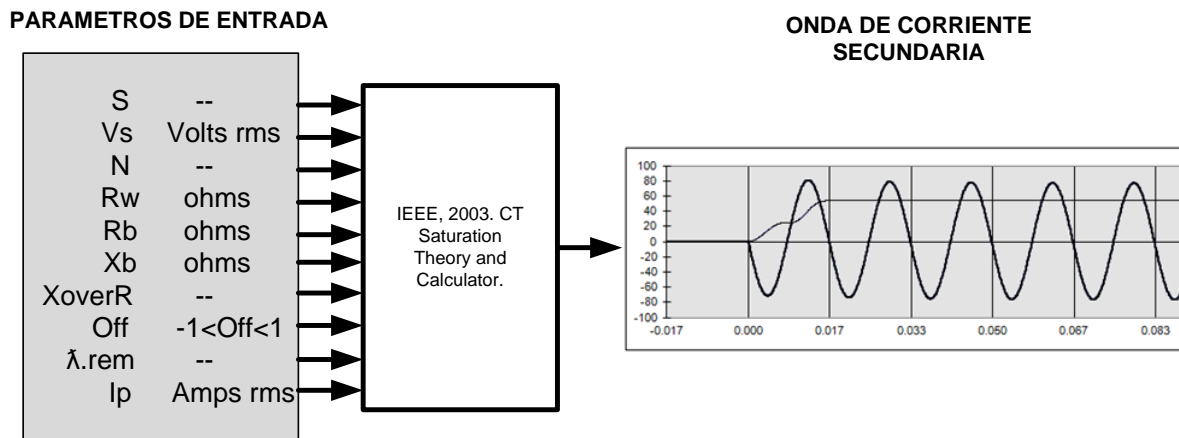
Esta prueba también se puede realizar energizando el primario del TC con una fuente de prueba de alta corriente y trazar el gráfico de excitación del TC, tomando valores de la corriente de excitación primaria frente al voltaje secundario de circuito abierto. Los valores observados de corriente deben ser divididos por la relación del TI para trazar el gráfico de excitación y comparar los datos observados con los datos del fabricante o de otros datos de referencia (Systems et al. 2007).

El propósito de esta prueba es confirmar que el TC es de la clase de exactitud especificada en la placa de características, para esto deben estar disponibles las curvas de diseño del fabricante para que los resultados obtenidos en la prueba puedan compararse con estas curvas teóricas. También para asegurar que el TC no tiene espiras en cortocircuito y/o corto circuitos físicos desarrollados en los bobinados primarios o secundarios del TC después de su instalación (Systems et al. 2007).

3 CAPITULO 3

Este capítulo presenta la caracterización de los parámetros necesarios para implementar la metodología de la identificación de transformadores de corriente saturados en un sistema de potencia; la metodología se fundamenta con el software de cálculo proporcionado por la “IEEE Power Systems Relaying Committee”; el cual a partir de unos parámetros de entrada descritos a continuación, indica si un TC se saturara para una aplicación particular. La información de salida entrega la forma de onda real de la corriente secundaria del TC como se muestra en el siguiente diagrama.

Figura 11. Diagrama de parámetros de entrada y salida.



3.1 Parámetros de entrada requeridos

Este software requiere parámetros de entrada asociados al modelo del transformador de corriente, la curva de saturación del TC, la remanencia presente en el núcleo del TC, el tipo de sistema de potencia y el nivel de offset DC presente en la corriente de cortocircuito en el punto donde está conectado el TC.

En la Figura 12 se ilustra la forma para introducir los parámetros necesarios para efectuar el cálculo de la onda de salida del TC con el software de cálculo “*CT Saturation Theory and Calculator*”.

Figura 12. Parámetros de entrada del software de cálculo.

INPUT PARAMETERS:		ENTER:	
Inverse of sat. curve slope =	S =	22	—
RMS voltage at 10A exc. current =	Vs =	400	volts rms
Turns ratio = $n_2/1$ =	N =	240	—
Winding resistance =	Rw =	0.000	ohms
Burden resistance =	Rb =	4.000	ohms
Burden reactance =	Xb =	2.000	ohms
System X/R ratio =	XoverR =	12.0	—
Per unit offset in primary current =	Off =	1.00	-1<Off<1
Per unit remanence (based on Vs) =	λ_{rem}	0.00	—
Symmetrical primary fault current =	Ip =	12,000	amps rms

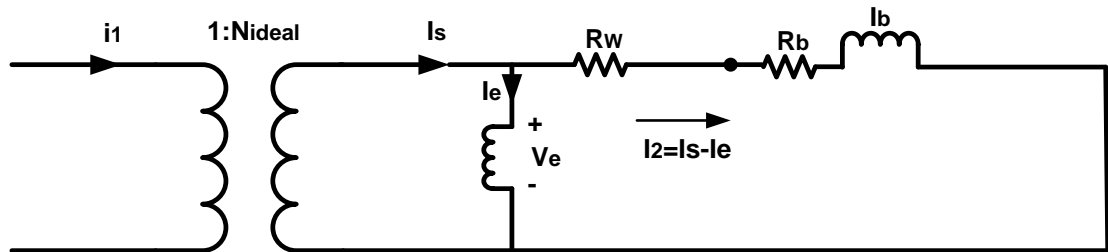
Fuente: IEEE PSRC committee, 2003a. CT SAT Calculator (PSRC).

A continuación se describen cada uno de los parámetros requeridos como datos de entrada al software de cálculo.

3.1.1 Parámetros asociados al modelo circuital del TC

El modelo circuital del TC utilizado en el software “CT Saturation Calculator” proporcionado por la “IEEE Power Systems Relaying Committee”, se ilustra en la Figura 13.

Figura 13. Modelo circuital del transformador.



Fuente: IEEE PSRC committee, 2003b. CT SAT Theory (PSRC).

Donde:

- i_1 Corriente primaria instantánea (A)
- i_2 Corriente secundaria instantánea (A)
- i_s Corriente secundaria ideal instantánea (A)
- i_e Corriente de excitación instantánea (A)
- v_e Voltaje de excitación instantáneo (V)
- R_w Resistencia del devanado secundario (Ω)
- R_b Resistencia de carga (Ω)
- L_b Inductancia de carga (Henrios)
- $1:N$ Relación de transformación

3.1.1.1 Relación de transformación del TC ($N = n_2/n_1$)

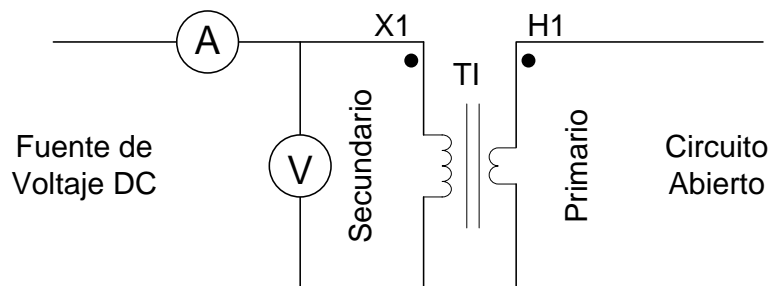
La relación de transformación propia de un transformador, es la razón entre la corriente primaria nominal y secundaria nominal.

3.1.1.2 Resistencia de devanado secundario (R_w)

La resistencia de devanado secundario medida en ohmios (Ω) obtenida de las pruebas de campo del TC es proporcionada por el fabricante. Si no está disponible este parámetro, se puede realizar la prueba de resistencia de devanados.

El valor de resistencia se puede obtener implementando el método del Voltímetro-Amperímetro, con puentes de resistencia especiales o un equipo especial (óhmetro) que internamente trabaja con el principio del Voltímetro-Amperímetro como lo muestra la Figura 14 y de acuerdo con la ley de Ohm a partir de las lecturas de voltaje y corriente calcula la resistencia según la norma IEEE C57.13.1.2007.

Figura 14. Esquema para medida de resistencia de devanado secundario.



Fuente: Systems, P. et al., 2007. IEEE Guide for Field Testing of Relaying. , (February).

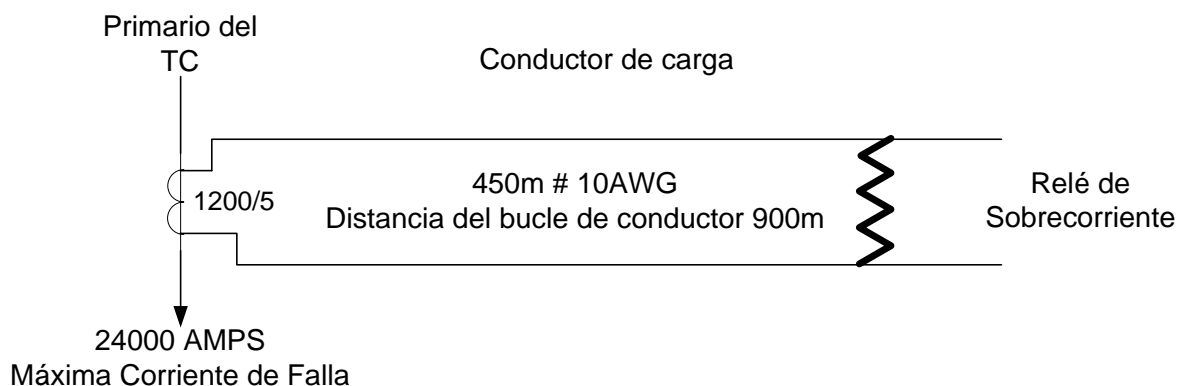
3.1.1.3 Resistencia (R_b) y reactancia (X_b) de carga

La carga del circuito secundario se puede obtener de dos maneras, una es haciendo el cálculo matemáticamente, sumando la carga interna y externa del TC, que sería la suma vectorial de la resistencia de devanado (carga interna del TC), la resistencia de los cables de conexión y la impedancia de los relés y medidores conectados al TC (carga externa del TC). Una comprobación del cálculo, es sumar las cargas individuales aritméticamente en lugar de vectorialmente, en muchos casos este enfoque es muy preciso, especialmente si la resistencia del devanado y la resistencia de los cables de conexión del TC tienen mayor influencia en la

carga secundaria total del TC, para el cálculo de carga se omite la resistencia de devanado (R_w) debido a que en el software de cálculo ya se ha incluido por aparte este valor (System et al. 2008).

En la Figura 15 se muestra un breve ejemplo de cómo se obtiene matemáticamente el valor de carga asociada al secundario del TC, asumiendo una carga puramente resistiva y despreciando la reactancia del devanado secundario del TC.

Figura 15. Esquema del circuito para el cálculo de resistencia de carga.



Fuente: System, P. et al., 2008. *IEEE Std C37.110'-2007, IEEE Guide for the Application of Current Transformers Used for Protective Relaying Purposes.*, 2007(April).

Datos:

- TC: Relación de transformación 1200/5
- $R_{Conductor}$: Resistencia de los cables de conexión, 450m de conductor #10:
 $450\text{ m} * (1.0\ \Omega / 300\text{ m}) * 2 = 3.0\ \Omega$
- $R_{Relé\ 51}$: Resistencia relé de sobrecorriente temporizado $R_{Relé\ 51} = 0.049\ \Omega$
- $R_{Relé\ 50}$: Resistencia relé de sobrecorriente instantáneo $R_{Relé\ 50} = 0.007\ \Omega$

La carga es la suma individual de cada una de las resistencias asociadas al secundario del TC.

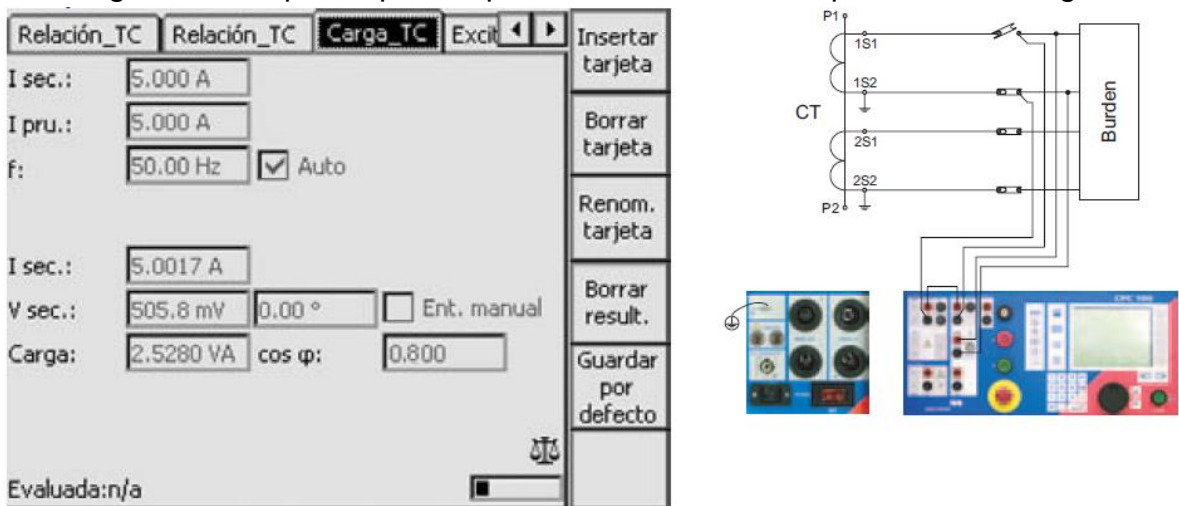
- Resistencia de carga: $R_b = R_{Conductor} + R_{Relé\ 51} + R_{Relé\ 50}$

$$R_b = 3.0 + 0.049 + 0.007 = 3.056\ \Omega$$

- Resistencia total: $R_t = R_w + R_b = 0.61 \, \Omega + 3.056 \, \Omega = 3.7 \, \Omega$

El cálculo para cuando se tiene en cuenta que la carga tiene una componente resistiva y una componente reactiva, se obtiene llevando a cabo la prueba de impedancia de carga que tiene asociada el devanado secundario del TC, para esta prueba se utiliza el equipo de pruebas universal para diagnostico eléctrico OMICRON CPC100, con el cual se pueden efectuar pruebas eléctricas en transformadores, transformadores de corriente, transformadores de tensión, sistemas de puesta a tierra, líneas y cables e interruptores de potencia. A continuación se muestra el diagrama para la medida de carga.

Figura 16. Esquema para la prueba de medida de impedancia de carga



La prueba de carga se lleva a cabo introduciendo la corriente nominal del secundario (5A) como corriente de prueba, y al momento de ejecutar la prueba, el equipo mide:

- Tensión del secundario en magnitud y ángulo
- Carga conectada en VA y factor de potencia ($\cos \varphi$)

La duración de la prueba es de aproximadamente 3 s y el software del equipo crea automática el informe

Como para la comprobación del cálculo de saturación se necesita introducir los parámetros de resistencia y reactancia de carga por separado, se entra a operar los valores de potencia aparente de carga y el factor de potencia de la carga que entrega la prueba como se muestra a continuación.

- Potencia aparente de carga $S_{carga} = 2.5280VA$
- Factor de potencia de la carga $\cos \varphi = 0.8$

$$S_{carga} = VI \quad (15)$$

$$S_{carga} = I^2 * Z_{carga} \quad (16)$$

$$Z_{carga} = \frac{S_{carga}}{I^2} = \frac{2.5280VA}{5 * 5} = 0.101\Omega \quad (17)$$

Teniendo la impedancia de carga y el factor de potencia, podemos obtener la resistencia y la reactancia de carga por separado.

$$R_b = Z_{carga} * \cos \varphi = 0.101 * 0.8 = 0.081\Omega \quad (18)$$

$$X_b = Z_{carga} * \sin \varphi = 0.101 * 0.6 = 0.061\Omega \quad (19)$$

3.1.2 Parámetros asociados a la curva de saturación del TC

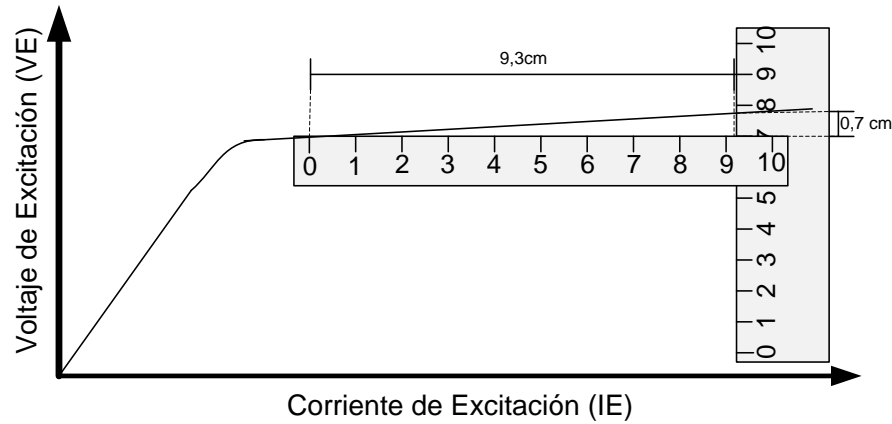
Los parámetros que necesitan ser extraídos de la curva de excitación del TC son: el inverso de la pendiente de la zona de saturación (S), el valor de voltaje [V] de saturación (V_s) del TC y la remanencia (λ_{rem}) en por unidad del núcleo del TC.

3.1.2.1 Inverso de la pendiente de la curva de excitación (S)

Se requiere calcular el valor de la pendiente ($1/S$) de la parte superior o zona de saturación de la curva de excitación del TC, esta curva se traza en escala logarítmica y su separación es por décadas. "S" se define como el recíproco de esta pendiente. El valor de S se encuentra típicamente entre $15 < S < 25$ (IEEE PSRC committee 2003).

Se pueden utilizar distintas maneras de obtener la pendiente de la parte superior de la curva de excitación, se pueden utilizar dos puntos sobre la recta y utilizar la ecuación de la pendiente de una recta $m = (y_2 - y_1)/(x_2 - x_1)$, o simplemente utilizando dos reglas y dividiendo las variaciones de la medida según la inclinación de la recta como se muestra en la Figura 17.

Figura 17. Como medir la pendiente de la curva de excitacion.



Fuente: IEEE PSRC committee, 2003a. CT SAT Calculator (PSRC).

Haciendo uso de dos reglas en la disposición horizontal y vertical como se muestra en la Figura 18, la pendiente se obtiene dividiendo la distancia en centímetros de elevación que tiene la zona superior de la curva (0,7cm la zona de saturación del TC) con respecto a la distancia de la línea horizontal imaginaria tomada después del voltaje de codo, donde empieza y hasta donde termina la zona de saturación (9,3cm) como lo muestra el siguiente calculo: (IEEE PSRC committee 2003).

$$pendiente = \frac{0.7}{9.3} = \frac{1}{S} \quad (20)$$

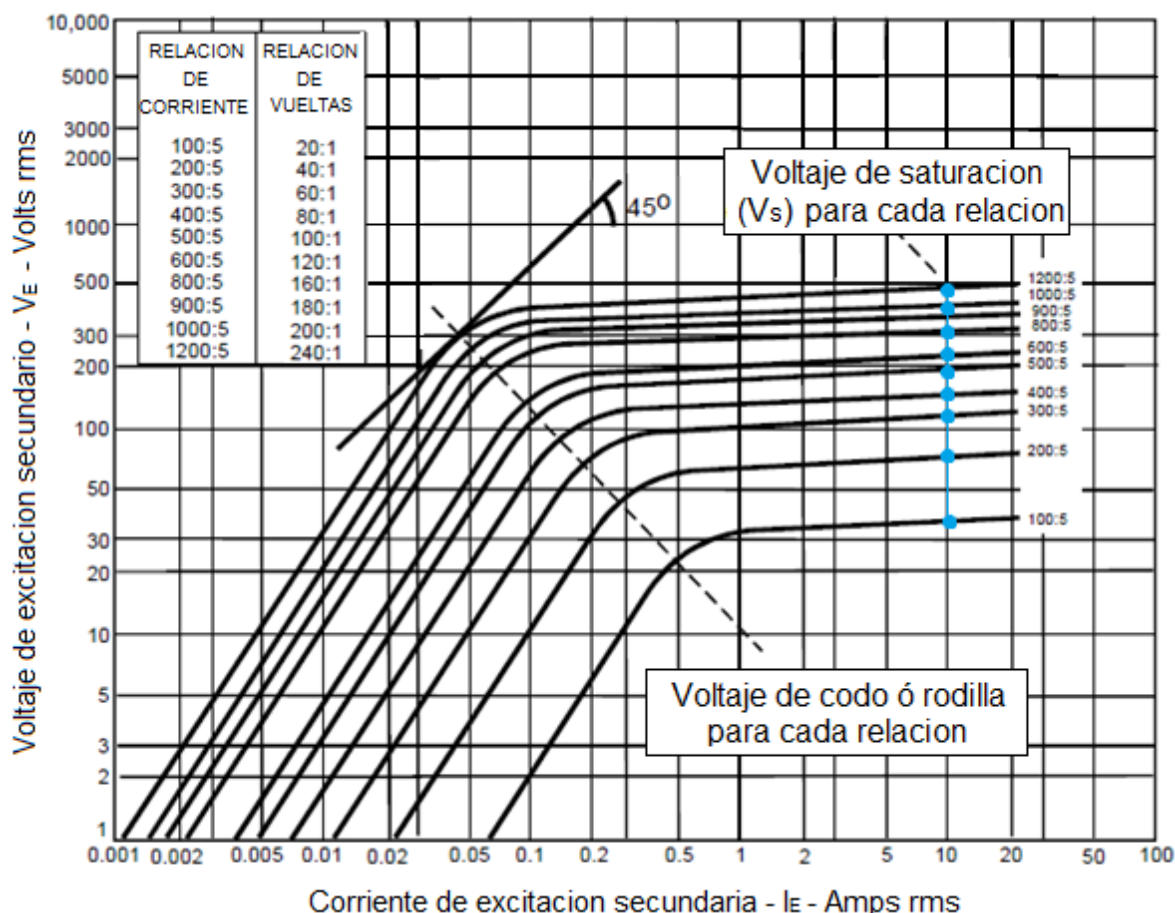
Para obtener el inverso de la pendiente se invierte la fracción y el resultado será:

$$S = \frac{9.3}{0.7} = 13 \quad (21)$$

3.1.2.2 Voltaje de saturación (V_S)

El voltaje de saturación (V_S) está definido como el voltaje de excitación rms secundario del TC, cuando el error de corriente secundaria es igual o mayor a 10%. En el caso particular a utilizar en la hoja de cálculo de saturación proporcionada por la IEEE, se utiliza como voltaje de saturación del TC, el valor de voltaje de excitación en el momento en que la corriente de excitación del TC es 10A como lo muestra la Figura 18 (IEEE PSRC committee 2003).

Figura 18. Voltajes de saturación para un TC multi-relacion clase C. [5]



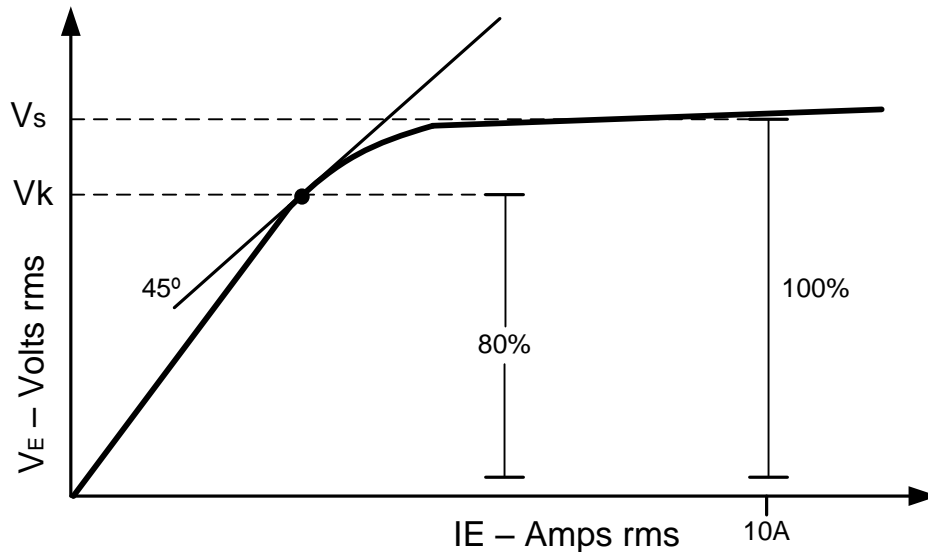
Fuente: System, P. et al., 2008. IEEE Std C37.110'-2007, IEEE Guide for the Application of Current Transformers Used for Protective Relaying Purposes. , 2007(April).

3.1.2.3 Remanencia en por unidad (p.u) basado en V_s (λ_{rem})

La remanencia en por unidad (λ_{rem}), está definida de acuerdo a la relación del voltaje de saturación (V_s) con respecto al voltaje de codo (V_K) en la curva de excitación del TC. Por ejemplo si el voltaje de codo (V_K) es el 80% del voltaje de saturación (V_s), entonces la remanencia en por unidad del TC seria 0.8pu (IEEE PSRC committee 2003).

A continuación en la Figura 19 se ilustra el ejemplo de cómo se obtiene el valor de remanencia del núcleo del TC, con respecto al voltaje de saturación a partir de la curva de excitación del TC.

Figura 19. Remanencia del TC calculada a partir de la curva de excitación.



Donde:

V_S Voltaje de saturación del TC (V)

V_K Voltaje de codo ó rodilla de la curva de saturación del TC (V)

Teniendo en cuenta la característica de construcción del núcleo del TC, el voltaje de codo se determina de la curva de saturación en un TC construido con núcleo sin agujeros (non-gapped core), en el punto donde la tangente a la curva hace un ángulo de 45° con el eje de abscisas (V_K como lo muestra la Figura 19) y cuando el TC tiene núcleo con agujeros (gapped core), el voltaje de codo es el punto donde la tangente a la curva formaría un ángulo de 30° con el eje de abscisas.

Otra definición utilizada es que el punto de inflexión de voltaje está situado en el punto de la curva, donde un aumento del 10% en la tensión secundaria causa un aumento del 50% en la corriente secundaria (System et al. 2008).

3.1.3 Características del sistema de potencia en el punto donde está conectado el TC

El software de cálculo requiere como datos de entrada algunas características del sistema de potencia donde se encuentra conectado el TC, como lo son la magnitud de la corriente de falla primaria simétrica máxima, el nivel de offset DC

presente en esta corriente y el valor de X/R desde donde está conectado el TC hasta el punto de falla máxima.

A continuación se abordan cada uno de estos parámetros del sistema de potencia.

3.1.3.1 Relación (X/R) (*XoverR*)

(X/R) Es la relación de la reactancia a la resistencia del circuito en el punto donde está instalado el TC, la disminución (o decremento) de la componente de DC depende de la relación (X/R) . X Corresponde a la reactancia y R a la resistencia de todos los componentes del circuito primario hasta el punto de falla.

Si $R = 0$ la relación es infinita y la componente de DC nunca disminuye, si $X = 0$ la relación es cero y la componente de DC disminuye instantáneamente. En el caso de relaciones intermedias, la componente DC disminuye con el transcurso del tiempo a cero, dependiendo la duración de este lapso de la relación específica (X/R) . A mayor reactancia con respecto a la resistencia, más tiempo tardará en disminuir la componente de DC (GONZÁLEZ & URIAS 2010).

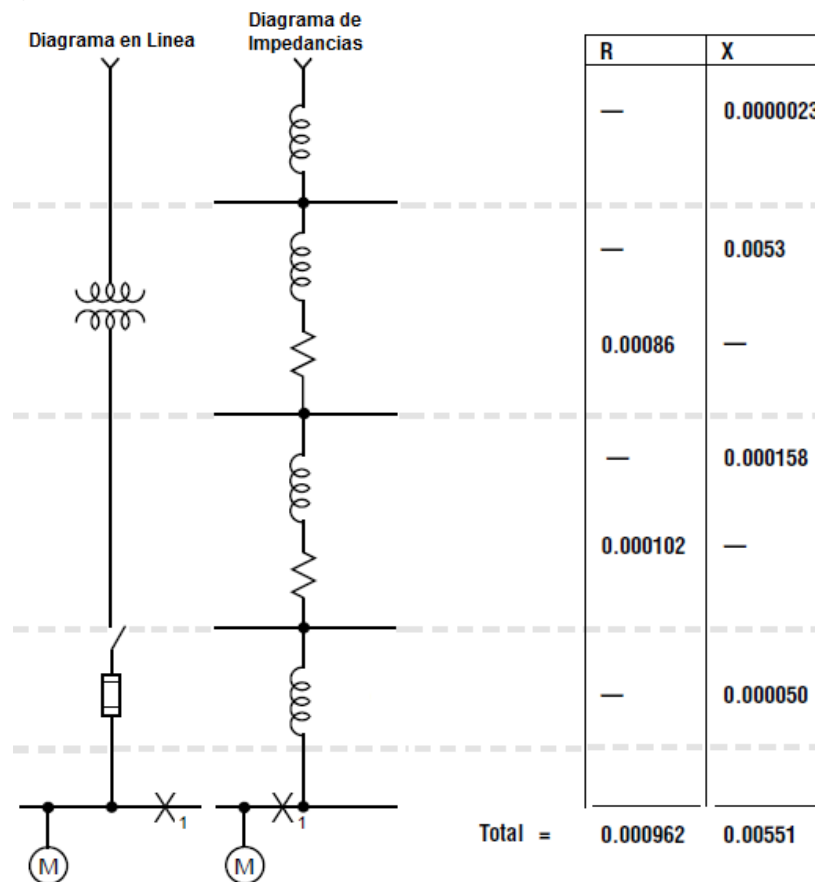
Para la obtención de la relación (X/R) en el punto de falla no existe un método que sea completamente preciso que pueda combinar dos circuitos paralelos con diferentes relaciones (X/R) en un solo circuito y obtener una única relación. La corriente de varios circuitos sería una suma de términos exponencialmente decrecientes, mientras que un solo circuito tendría un solo término y facilitaría la obtención de dicha relación.

Algunas investigaciones han encontrado que reduciendo cada elemento del sistema a una reactancia equivalente despreciando las resistencias o reduciendo cada elemento del sistema a una resistencia equivalente despreciando las reactancias, se puede calcular la relación (X/R) en el punto de falla con mayor precisión que cualquier método práctico conocido.

Con base en lo anterior, se construye una red de reactancias de todos los elementos de la red y una red de resistencias correspondientes a cada reactancia; cada red se resuelve por separado y se calcula la relación (X/R) .

A continuación se muestra una red de impedancias similar a la red donde está conectado un TC.

Figura 20. Red de impedancias donde esta conectado un TC.



Fuente: Part 1 A Simple Approach Short Circuit Basic Considerations of Short-Circuit Calculations

La relación de reactancia a la resistencia (X/R) de la red es:

$$\frac{X}{R} = \frac{0.00551 \, \Omega}{0.000962 \, \Omega} = 5.73 \quad (22)$$

Para fallas monofásicas se utiliza la ecuación 23, usando también las reactancias de secuencia cero:

$$\frac{X}{R} = \frac{2X_1 + X_0}{2R_1 + X_0} \quad (23)$$

Para fallas trifásicas se utiliza la siguiente ecuación, usando solo la reactancia y resistencia total hasta el punto de falla:

$$\frac{X}{R} = \frac{2X_1}{2R_1} \quad (24)$$

Dónde:

X_1 Reactancia total hasta el punto de falla máxima en (Ω)

X_0 Reactancia de secuencia cero en (Ω)

R_1 Resistencia total hasta el punto de falla máxima en (Ω)

En vez de la reactancia se puede utilizar el módulo de la impedancia si esta también fue utilizada para el cálculo de la corriente simétrica de cortocircuito (ROMERO & OCTAVO 2012).

3.1.3.2 Corriente de falla primaria simétrica (I_p)

Otro valor requerido por el software de cálculo es la magnitud de corriente de cortocircuito simétrica, presente en el punto del sistema de potencia en donde está conectado el TC, la cual permitirá comprobar si la saturación se presenta.

La corriente total de cortocircuito en el sitio de ubicación del TC, está conformada por dos componentes. El primer componente (I_p), es una función sinusoidal respecto del tiempo que representa la componente de AC (corriente alterna) de la corriente de cortocircuito; la magnitud de la componente de AC es el valor de la corriente de cortocircuito en estado estacionario.

$$I_p = I \cdot \sin(\omega t + \varphi - \theta) \quad (25)$$

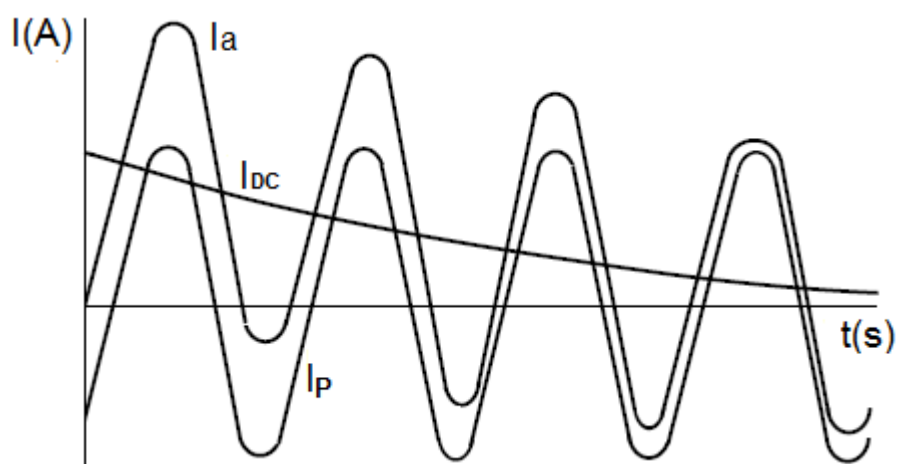
El segundo componente (I_{DC}), es una función exponencial decreciente respecto del tiempo que representa la componente de DC (corriente directa) de la corriente de cortocircuito; la componente de DC decrece hasta cero ya que la energía de dicha componente es disipada por el efecto Joule ($I^2 R$) en la resistencia del circuito.

$$I_{DC} = -I \cdot \sin(\varphi - \theta) \cdot e^{-\left(\frac{R}{X}\right)t} \quad (26)$$

La componente de AC es comúnmente conocida como la corriente simétrica de cortocircuito. La corriente asimétrica o corriente total de cortocircuito es la suma de las componentes de AC y DC. A continuación la Figura 21 muestra el oscilograma de la corriente total de cortocircuito así como también muestra sus dos componentes, la corriente simétrica de cortocircuito (componente AC) y la componente de DC, todas en función del tiempo (ROMERO & OCTAVO 2012).

$$I_a = I_{DC} + I_p \quad (27)$$

Figura 21. Corriente total de cortocircuito y sus dos componentes.



Fuente: ROMERO, A.M. & OCTAVO, R.F.O., 2012. *Revisión y Especificación de Capacidades*.

Donde:

I_a Corriente total de cortocircuito RMS asimétrica

I_{DC} Componente DC de la corriente de cortocircuito

I_p Componente AC simétrica de la corriente de cortocircuito

La magnitud de corriente que requiere como entrada el software de cálculo es la componente AC simétrica de la corriente de cortocircuito (I_p)

3.1.3.3 Offset en por-unidad (p.u) presente en la corriente primaria (*off*)

La forma de la onda de corriente secundaria entregada por el TC sufre un desplazamiento en el eje de ordenadas, debido al nivel de offset DC presente en la onda de corriente de cortocircuito del punto donde está ubicado el TC en el sistema de potencia. Este fenómeno offset y no offset se evidencia en las formas de onda explicadas anteriormente en el ítem 2.2.2 y mostradas en las figuras 22 y 23.

Figura 22. En TC no saturado. Corriente primaria vs flujo y corriente primaria vs corriente secundaria.

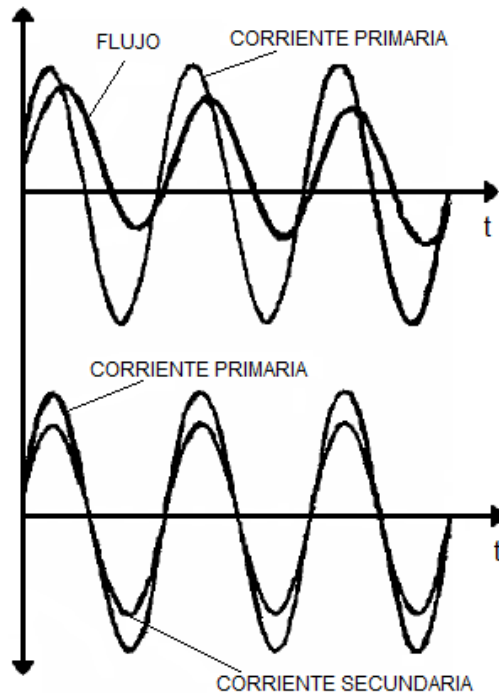
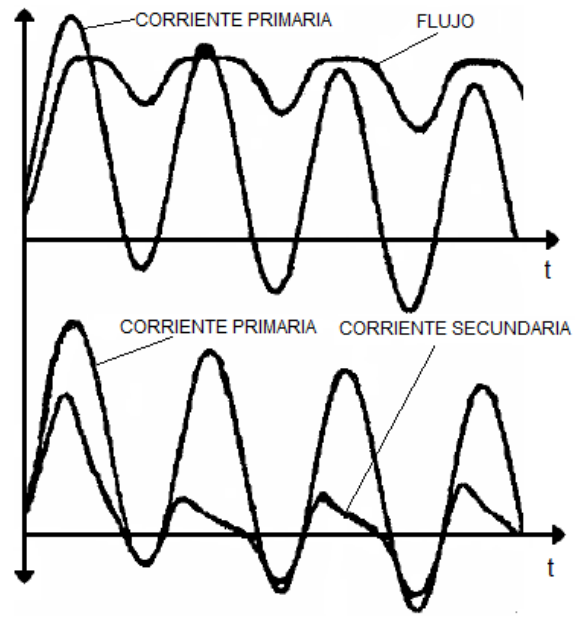


Figura 23. En TC saturado. Corriente primaria vs flujo y corriente primaria vs corriente secundaria.



Fuente: System, P. et al., 2008. IEEE Std C37.110'-2007, IEEE Guide for the Application of Current Transformers Used for Protective Relaying Purposes. , 2007(April).

Conociendo las magnitudes de corriente simétrica y la componente DC de la corriente de cortocircuito obtenidos principalmente del estudio previo de cortocircuito hecho al sistema de potencia en donde se encuentra conectado el TC objeto de estudio; podemos obtener el valor de la corriente total asimétrica de corto, la cual utilizaremos como base para calcular el nivel de offset DC en por unidad como se muestra en el siguiente ejemplo. En este caso los datos del estudio de cortocircuito son proporcionados por la Empresa de Energía del Pacífico (EPSA) los cuales se abordan en el siguiente capítulo donde se realiza la comprobación de saturación.

Teniendo los siguientes valores aleatorios como ejemplo para poder mostrar y hacer el cálculo del nivel de offset que estaría presente en la corriente de cortocircuito con valores de $I_p = 8,04 \text{ KA}$ e $I_{DC} = 0,9 \text{ KA}$, obtenemos la corriente total asimétrica de corto.

$$I_a = \sqrt{I_P^2 + I_{DC}^2} = \sqrt{8,04KA^2 + 0,9KA^2} = 8,0902KA \quad (28)$$

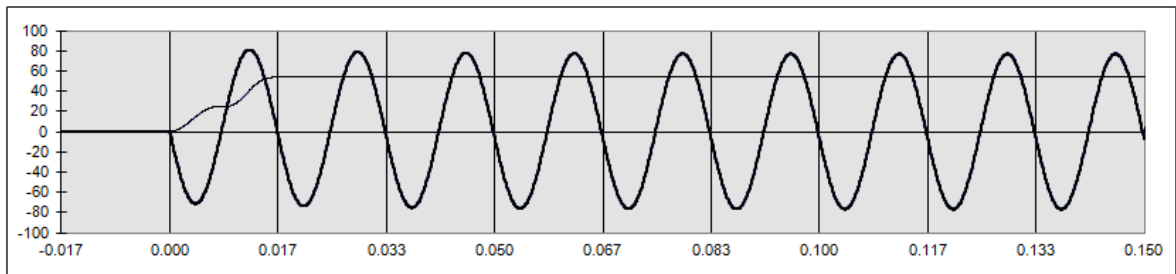
El nivel de offset entonces será:

$$Valor \text{ en } p.u = \frac{Valor \text{ Real}}{Valor \text{ Base}} = \frac{0,9KA}{8,0902KA} = 0,111p.u \quad (29)$$

3.2 Forma de onda de salida entregada por el software de cálculo

El resultado final del cálculo es la elaboración y obtención de la forma de onda real e ideal de la corriente secundaria que sería entregada por el transformador de corriente a los dispositivos de protección asociados al devanado secundario del TC en un grafico de corriente vs tiempo, como lo muestra la Figura 24 y 25.

Figura 24. Onda secundaria no distorsionada real (negra) e ideal (azul) entregada por el TC.



Fuente: IEEE PSRC committee, 2003a. CT SAT Calculator (PSRC).

Por medio de parámetros de entrada teóricos aleatorios, se obtiene la forma de la curva de corriente secundaria del TC mostrada en la Figura 24. Se puede evidenciar que solo se observa la curva negra (real) por lo que no hay diferencia alguna entre la onda real (negra) y la onda ideal (azul), por lo que se puede afirmar que el TC no estaría en riesgo de saturarse con estos parámetros de entrada predeterminados.

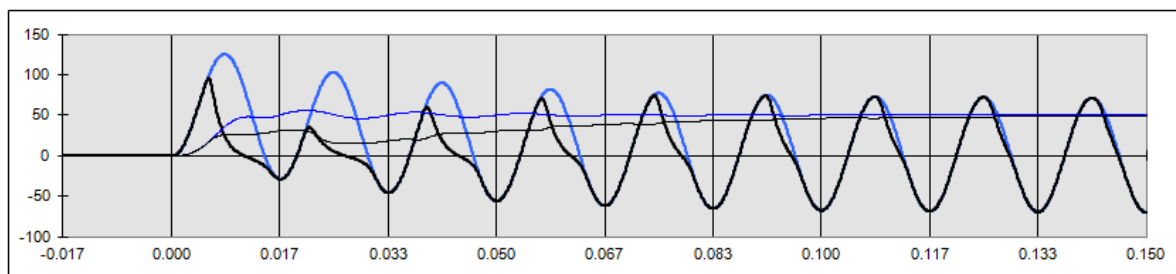
El caso contrario en el cual se presenta una posible saturación en el núcleo del TC es cuando los parámetros de entrada ya sea asociados a la construcción del TC ó a los niveles de falla presentes en el punto de ubicación del TC en el sistema de potencia no están dentro límites permisibles para que el TC refleje de manera correcta los eventos anormales de falla a los relés de protección, como por

ejemplo a continuación se presenta un cálculo rápido de una no correcta especificación de un TC de protección para una aplicación en particular en donde se presenta una corriente de cortocircuito simétrica mayor a la especificada según la clase de precisión ANSI/IEEE del TC.

- Corriente de cortocircuito en el punto de conexión del TC, $I_p = 30\text{ KA}$
- Relación de transformación del TC: 1000/5
- Clase de precisión ANSI/IEE: C100

La clase de precisión me dice que el error de relación del TC C100 no debe exceder el 10% para cualquier corriente de 1 a 20 veces la corriente secundaria nominal del TC, si la carga no excede 1Ω . Basado en este criterio la máxima corriente de falla para que el TC opere correctamente sería 20000 A, y por esta razón se podría afirmar que el TC podría saturarse y presentar una distorsión de la forma de onda de corriente secundaria en sus primeros ciclos similar a la mostrada en la Figura 25, sin decir que los demás parámetros asociados a la curva de saturación, construcción del TC y a las características del sistema de potencia donde se encuentre conectado el TC no incluidos en este ejemplo no son importantes o no generan una influencia importante en la proximidad al fenómeno de saturación del núcleo de los TC.

Figura 25. Onda secundaria distorsionada real (negra) e ideal (azul) entregada por el TC.



Fuente: IEEE PSRC committee, 2003a. CT SAT Calculator (PSRC).

4 CAPITULO 4

Este capítulo presenta la implementación de la metodología para la identificación de transformadores de corriente saturados, sobre un TC conectado en un sistema eléctrico de potencia real.

La comprobación de la saturación se realizó utilizando un transformador de corriente perteneciente a la Empresa de Energía del Pacífico (EPSA), ubicado en la subestación eléctrica Meléndez (SME-115/34.5/13.2 kV) situada en la ciudad de Santiago de Cali - Colombia para el caso donde el cortocircuito se hace en la barra de la SE Meléndez con los aportes al cortocircuito de la SE Alférez II y la SE Pance, teniendo al TC dentro del sistema de potencia en una configuración anillada.

Figura 26. Transformador de corriente ABB IMBD 145 A4



Fuente: EPSA, Catalogo: Equipos en subestaciones de distribución

El transformador de corriente ABB IMBD 145 A4 tiene las siguientes características

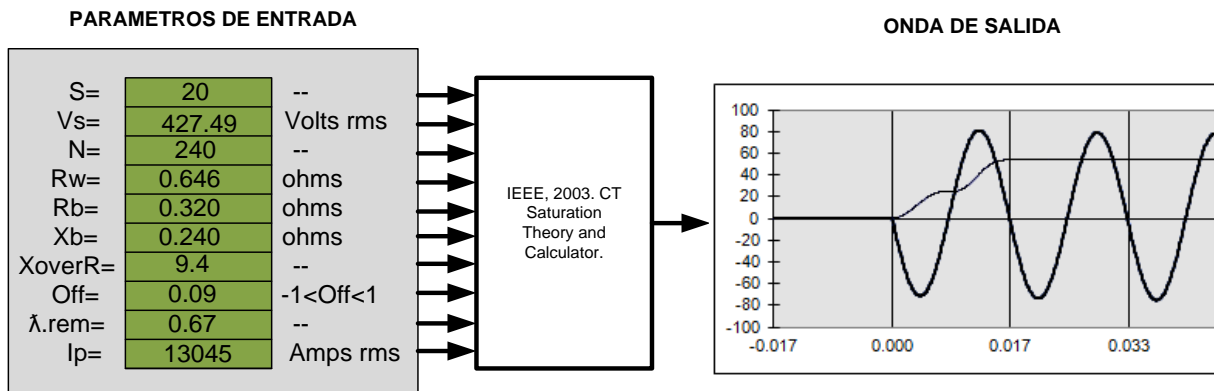
- Constructor: ABB (Asea Brown Boveri).
- Número de serie: 7334216/7/8.
- Relaciones de transformación: 100/200/300/400/600/800/1000/1200/5 A.
- Tensión nominal: 145 kV
- Corriente nominal: 1.2 kA
- Potencia nominal: 174 kVA
- Frecuencia nominal: 60 Hz.
- Clase de precisión para protección: C100
- La tensión más elevada para el equipo: No contiene información.
- Clase de aislamiento: Aceite mineral.
- El nivel de aislamiento nominal: BIL 650 kV
- Corriente de limite térmico: 60 kA/1s
- Corriente de limite dinámica: 150 kA

4.1 TC conectado en un sistema de potencia anillado

Un sistema en malla o anillo es uno en el cual las cargas tienen una doble alimentación y puede interrumpirse una de ellas sin causar una interrupción del suministro de energía, estos sistemas anillados se consideran confiables pero a un costo elevado.

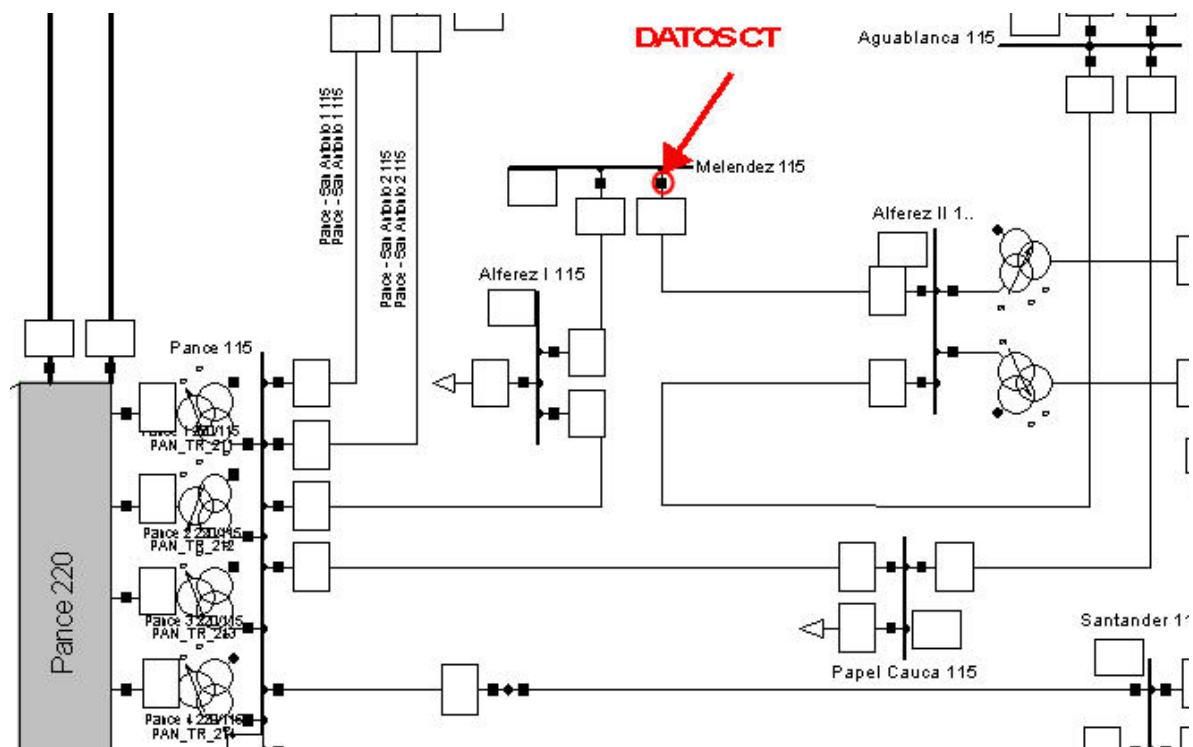
El resumen de los parámetros operados por la hoja de cálculo de saturación para obtener la salida de la forma de onda entregada por el devanado secundario para el TC conectado en un sistema anillado es el siguiente.

Figura 27. Diagrama de parámetros de entrada y salida.



En la Figura 28 se muestra el diagrama unifilar del sistema anillado del que hace parte el TC al cual se le realizo el análisis.

Figura 28. Diagrama unifilar del sistema anillado en donde está conectado el TC.



Fuente: Dig SILENT Power Factory 15.2

Los parámetros para hacer uso del software de cálculo, proporcionados por EPSA son los siguientes:

Tabla 3. Parámetros proporcionados por EPSA.

PARAMETROS PROPORCIONADOS POR EPSA		
ASOCIADOS A	PARAMETRO	
Transformador de corriente	Relación de Transformación	N = 1200:5 A
	Resistencia de devanados secundarios	Rw = 645,99 mΩ
Curva de excitación	Voltaje de saturación	Vs = 427,49 V
	Voltaje de codo ó rodilla	Vk = 284,15 V
Sistema de Potencia	Relación X/R	X/R = 9,4
	Corriente de falla simétrica	Ip = 13,045 kA
	Nivel de DC de la corriente de falla	Idc = 1,14 kA

A continuación se presenta la metodología para la obtención de los parámetros de entrada requeridos para realizar la evaluación de saturación del TC por medio del software de cálculo.

4.1.1 Parámetros asociados al modelo circuital del TC

4.1.1.1 Relación de transformación del TC ($N = n_2/n_1$)

La relación de transformación del TC es obtenida de la placa de características (Anexo B. Catalogo: Equipos en Subestaciones-Distribución).

$$N = \frac{n_2}{n_1} = \frac{1200}{5} = 240 \quad (30)$$

4.1.1.2 Resistencia de devanado secundario (R_w)

Las resistencias de devanados secundarios obtenidas de las pruebas de campo hechas por el fabricante de acuerdo al ítem 3.1.1.2 donde se explica el método de medida de la resistencia de devanados para cada uno de los TC por fase son: (Anexo B. Catalogo: Equipos en Subestaciones-Distribución).

$$\text{Resistencia Fase R} = 645.99 \text{ m}\Omega$$

$$\text{Resistencia Fase S} = 639.30 \text{ m}\Omega$$

$$\text{Resistencia Fase T} = 610.82 \text{ m}\Omega$$

4.1.1.3 Resistencia y reactancia de carga

Para medir la impedancia de carga asociada al devanado secundario del TC, se utilizo el equipo de pruebas universal para diagnostico eléctrico OMICRON CPC100 como se explico anteriormente en el numeral 3.1.1.3.

Del resultado de la prueba se obtuvo los valores de potencia aparente y el factor de potencia de la carga. Entramos a operar estos valores como se muestra a continuación.

- Potencia aparente de carga $S_{carga} = 10 \text{ VA}$
- Factor de potencia de la carga $\cos \varphi = 0.8$

$$S_{carga} = VI \quad (31)$$

$$S_{carga} = I^2 * Z_{carga} \quad (32)$$

$$Z_{carga} = \frac{S_{carga}}{I^2} = \frac{10VA}{5 * 5} = 0.4\Omega \quad (33)$$

Teniendo la impedancia de carga y el factor de potencia, se obtuvo la resistencia y la reactancia de carga por separado.

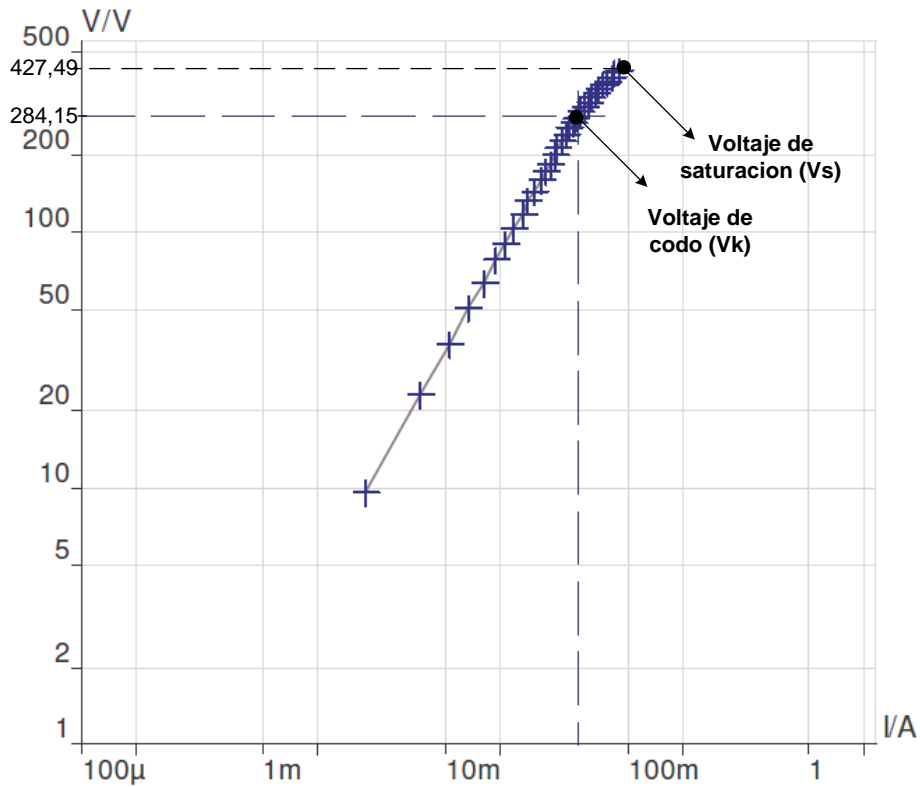
$$R_b = Z_{carga} * \cos \varphi = 0.4 * 0.8 = 0.32\Omega \quad (34)$$

$$X_b = Z_{carga} * \sin \varphi = 0.4 * 0.6 = 0.24\Omega \quad (35)$$

4.1.2 Parámetros asociados a la curva de saturación del TC

La curva de saturación del TC ABB IMBD 145 A4 se obtuvo de la prueba de excitación proporcionada por EPSA de acuerdo a las medidas de voltaje y corriente de excitación secundaria presentado en el (Anexo A).

Figura 29. Curva de saturación del TC ABB IMBD 145 A4



Fuente: EPSA, Catalogo: Equipos en subestaciones de distribución

4.1.2.1 Inverso de la pendiente de la curva de saturación (S)

Como se explicó en el numeral 3.1.2.1, para calcular el valor de la pendiente ($1/S$) de la parte superior o zona de saturación de la curva de excitación del TC, se puede hacer uso de dos reglas en la disposición mostrada en el ítem 3.1.2.1. ó identificando dos puntos sobre la recta y haciendo uso de la ecuación de la recta para obtener la pendiente.

A medida que se implementaba la metodología se determinó de la curva de excitación del TC mostrada en la Figura 29, que en esta grafica no se tuvieron en cuenta todos los puntos de medida que hacen parte de la zona de saturación de los cuales se obtiene la pendiente de esta zona, además teóricamente según “*saturation theory and calculator*” el cálculo de saturación no es significativamente variable a el valor de S y que este valor se encuentra típicamente en un rango de ($15 < S < 25$), teniendo en cuenta estas razones y demostradas a continuación se decidió tomar un valor basado en la curva de excitación típica para un TC multi-relación clase C mostrada en la norma IEEE Std C37.110-2007 y explicada posteriormente al análisis de la influencia de S sobre la forma de onda secundaria.

4.1.2.1.1 Análisis de la influencia de (S) sobre la forma de onda entregada por el TC

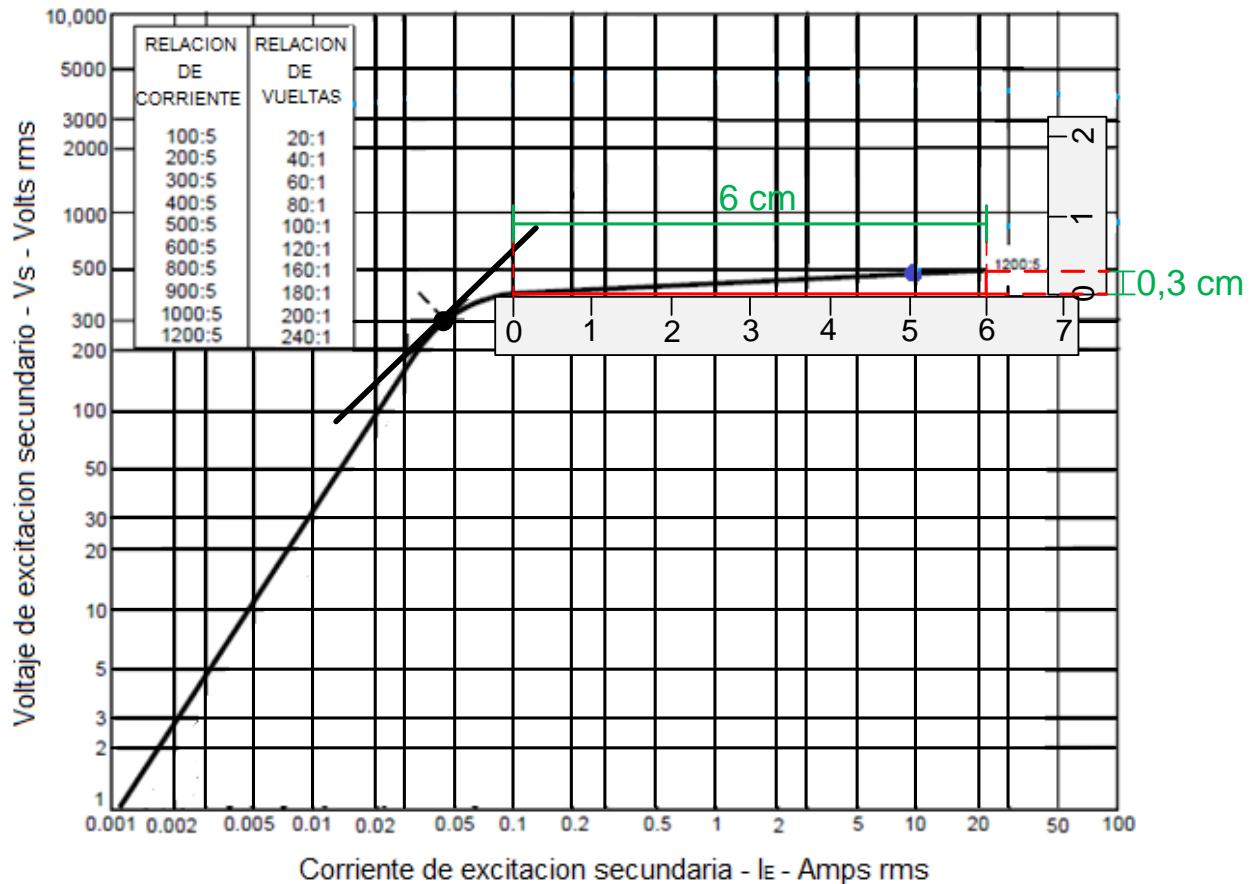
Como se dijo en el numeral anterior, el cálculo del parámetro S que se obtiene de la curva de excitación del TC, no se pudo calcular debido a que no se conoce realmente la prolongación o zona de saturación completa de la curva de excitación del TC IMBD 145 A4, por esta razón se decide trabajar con diferentes valores de S entre el rango típico ($15 < S < 25$), para observar el comportamiento de la forma de onda que toma la corriente secundaria, en el Anexo C se muestran los diferentes resultados para evidenciar que la gráfica de corriente elaborada por el software de calculo que entrega el TC a los dispositivos de protección no es muy sensible y no presenta mayor diferencia al cambio del valor de S .

4.1.2.1.2 Parámetro (S) tomado de la curva de excitación típica para un TC multi-relación clase C de la norma IEEE Std C37.110-2007

Teniendo en cuenta que no se puede obtener el parámetro S de la curva de excitación real del TC bajo prueba, se tomo como referencia la curva de excitación típica para un TC multi-relación clase C expuesta en la norma para obtener este valor de S .

El parámetro **S** se obtuvo desde la curva de excitación típica para un TC con las mismas características del TC bajo prueba, clase C y con relación de transformación 1200/5 de la siguiente manera mostrada en la Figura 30 y soportado por el Anexo C.

Figura 30. Obtención del parámetro **S** a partir de la curva de excitación típica para un TC multi-relacion clase C



Fuente: System, P. et al., 2008. IEEE Std C37.110'-2007, IEEE Guide for the Application of Current Transformers Used for Protective Relaying Purposes. , 2007(April).

Haciendo uso de dos reglas en la disposición horizontal y vertical como se muestra en la Figura 30, la pendiente se obtuvo dividiendo la distancia en centímetros de elevación que tiene la zona superior de la curva (0,3cm la zona de saturación del TC) con respecto a la distancia de la línea horizontal imaginaria tomada después del voltaje de codo, donde empieza y hasta donde termina la zona de saturación (6cm) como lo muestra el siguiente calculo:

$$pendiente = \frac{0.3}{6} = \frac{1}{S} \quad (36)$$

Para obtener el inverso de la pendiente se invierte la fracción y el resultado será:

$$S = \frac{6}{0.3} = 20 \quad (37)$$

4.1.2.2 Voltaje de saturación V_s

Como se explico en el numeral 3.1.2.2, el voltaje de saturación utilizado de acuerdo al caso particular de la herramienta utilizada, es el valor de voltaje de excitación sobre la curva de saturación en el momento en que la corriente de excitación del TC es 10 A.

Por la razón de que no se tiene graficada la parte de la curva de excitación mostrada en la Figura 29 para el valor de voltaje de excitación igual a 10A, se decidió tomar como voltaje de saturación (V_s), el ultimo valor de voltaje medido y graficado en la curva en el momento de realizar la prueba de excitación, esto basado en que este valor ya está por encima del voltaje de codo donde empieza a saturarse el TC y es el punto donde la curva comienza a presentar linealidad, evidenciado en el (Anexo A), con la tabla de los puntos de medida de corriente y voltaje de excitación obtenidos en la prueba

El último punto de medida que se tomo para la elaboración del grafico de la curva de excitación del TC fue:

$$I_E = 90.197mA \quad , \quad V_E = 427.49V$$

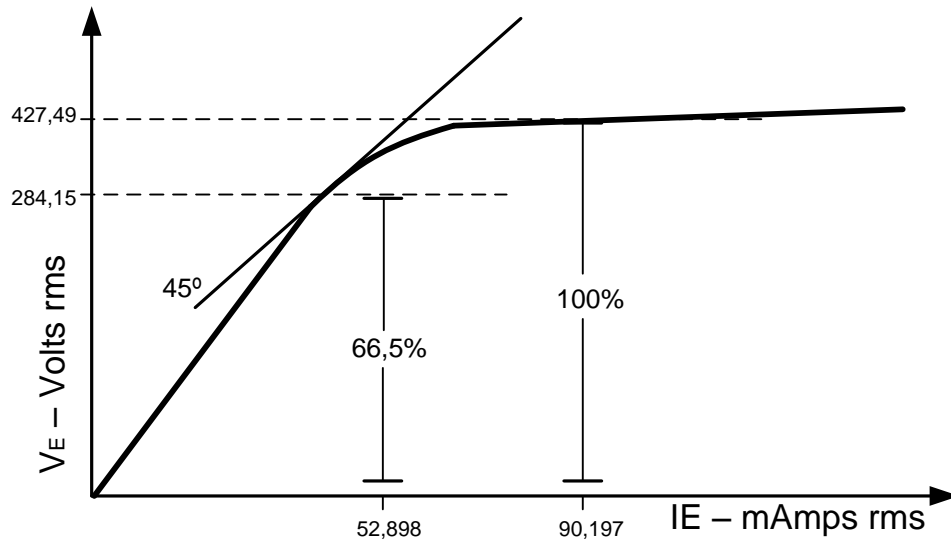
El voltaje de saturación mostrado en la Figura 29 a introducir en la hoja de cálculo es entonces:

$$V_s = 427.49V$$

4.1.2.3 Remanencia en por unidad (p.u) basado en V_s (λ_{rem})

La remanencia en (p.u) que se utilizo de acuerdo al caso particular de la hoja de cálculo de saturación proporcionada por la IEEE, está definida de acuerdo a la relación del voltaje de saturación (V_{sat}), con respecto al voltaje de codo (V_K) en la curva de excitación del TC, como se explico en el ítem 3.1.2.3.

Figura 31. Remanencia del TC calculada a partir de la curva de excitación.



$$V_S = 427.49V$$

$$V_K = 284.15V$$

La relación entre el voltaje de saturación y el voltaje de codo ó rodilla es:

$$\lambda_{rem} = \frac{V_K}{V_S} = \frac{284.15V}{427.49V} = 0.665 \text{ pu} \quad (38)$$

4.1.3 Parámetros asociados al sistema de potencia donde está conectado el TC

Los datos asociados al sistema de potencia en el punto donde está conectado el TC en la subestación eléctrica MELENDEZ (SME-115/34.5/13.2 kV), se obtuvieron de la simulación y estudio de cortocircuito del sistema de potencia en el programa "DigSILENT PowerFactory 15.2" utilizado por EPSA para simular sus sistemas de potencia.

4.1.3.1 Relación de la reactancia a la resistencia (X/R) ($XoverR$)

La relación (X/R) del sistema a evaluar, desde el punto donde está conectado el TC hasta el punto de falla máxima fue proporcionado por EPSA. La relación es igual a:

$$X/R = 9.41$$

4.1.3.2 Corriente de falla primaria simétrica (I_p)

La corriente de falla primaria simétrica en la barra de la SE Meléndez proporcionada por las simulaciones del sistema de potencia en el programa “DigSILENT PowerFactory 15.2” utilizado por EPSA es.

$$I_p = 13045 A$$

4.1.3.3 Offset en por unidad presente en la corriente de falla primaria (off)

El nivel de offset DC en por unidad, el cual genera el desplazamiento de la onda de corriente en el eje (y) del grafico de corriente en función del tiempo se obtiene de la siguiente manera.

Conociendo las magnitudes de corriente de falla simétrica y de la componente DC que tiene asociada, podemos obtener el valor de la corriente total asimétrica de corto, la cual utilizaremos como base para calcular el nivel de offset DC en por unidad como se muestra en el siguiente ejemplo.

Teniendo los valores de $I_p = 13,045 KA$ e $I_{DC} = 1,14 KA$, obtenemos la corriente total asimétrica de corto.

$$I_a = \sqrt{I_p^2 + I_{DC}^2} = \sqrt{13,045KA^2 + 1,14KA^2} = 13,094KA \quad (39)$$

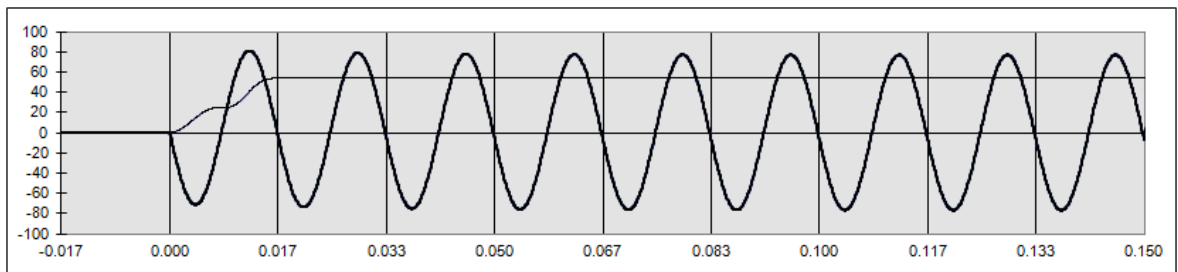
El nivel de offset entonces será:

$$Valor \text{ en } p.u = \frac{Valor \text{ Real}}{Valor \text{ Base}} = \frac{1,14KA}{13,094KA} = 0,087p.u \quad (40)$$

$$off = 0.087 pu$$

A continuación se muestra la forma de onda de salida del software de cálculo para el caso 1.

Figura 32. Onda secundaria real (negra) e ideal (azul) entregada por el TC.

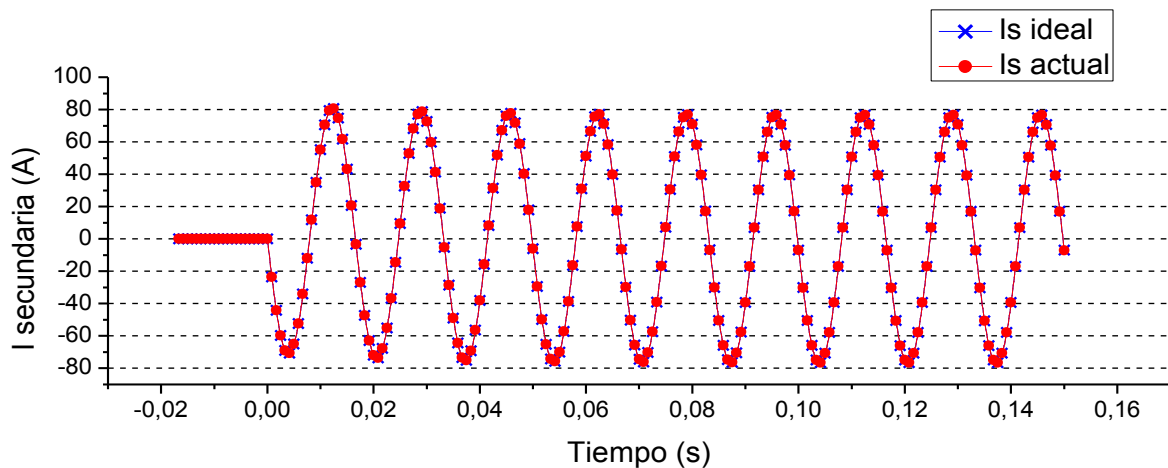


Fuente: IEEE PSRC committee, 2003a. CT SAT Calculator (PSRC).

Analizando el resultado de la forma de onda entregada por el secundario del TC calculada por el software “*saturation theory and calculator*”, se puede observar que no hay diferencia apreciable entre la curva ideal (color azul) y la curva real (color negro), por lo que podemos afirmar que el TC en análisis situado en la SE (SME-115/34.5/13.2 kV), en donde está conectado en la configuración en anillo, no se presenta un grado importante del fenómeno de saturación magnética del núcleo de hierro que lo conforma.

Una segunda ilustración graficada en el programa Origin Pro 8 con la tabulación de datos generada por el software de cálculo de saturación para el caso 1, donde se puede observar con mayor detalle que no hay diferencia entre la curva actual e ideal de la corriente secundaria que estaría entregando el TC a los dispositivos de protección es mostrada en la siguiente Figura 33.

Figura 33. Onda secundaria real (rojo) e ideal (azul) entregada por el TC.



Fuente: Origin Pro 8.

Un análisis adicional desarrollado para evaluar el rendimiento del TC en situación de falla, es la influencia importante que tiene el nivel de corriente de cortocircuito simétrica y el nivel offset DC en la posible saturación del núcleo como se muestra a continuación.

4.1.3.4 Análisis de la influencia de la corriente de falla simétrica y el offset DC en el cálculo de saturación

El nivel de corriente simétrica y offset DC, que son componentes de la corriente asimétrica total de cortocircuito, son dos de los factores que representan mayor

importancia a la hora de evaluar una posible saturación de un TC, por esta razón se realizó el siguiente análisis de saturación, primero variando el nivel de offset dejando la corriente simétrica constante y luego variando la corriente simétrica dejando el nivel de offset constante.

En la Tabla 4 se muestra el cuadro resumen con los datos utilizados del análisis cuando se varía el nivel de corriente DC, manteniendo el nivel de corriente simétrica constante.

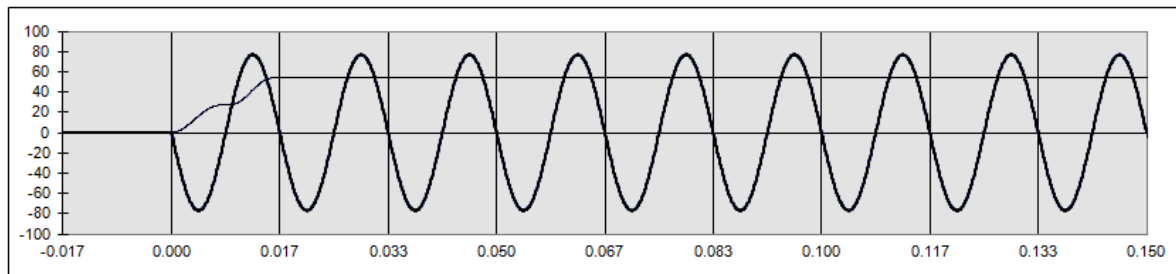
Tabla 4. Datos análisis de sensibilidad con I_a constante

I_p Cte (A)	I_{DC} (A)	off (p.u)	I_a (A)
13045	0	0	13045
13045	2665	0.20016	13314.4376
13045	5695	0.4001	14233.94
13045	7535	0.50017	15064.8017
13045	9785	0.6005	16307
13045	12790	0.70009	18268.9935

En las siguientes Figuras 32, 34, 35, 36 y 37 se ilustran las formas de onda graficadas por el software de cálculo, las cuales serían entregadas por el secundario del TC a los dispositivos de protección, para diferentes valores de offset DC, manteniendo constante la magnitud de la componente simétrica de la corriente de falla total asimétrica.

- **Corriente secundaria entregada por el TC con ($off = 0$)**

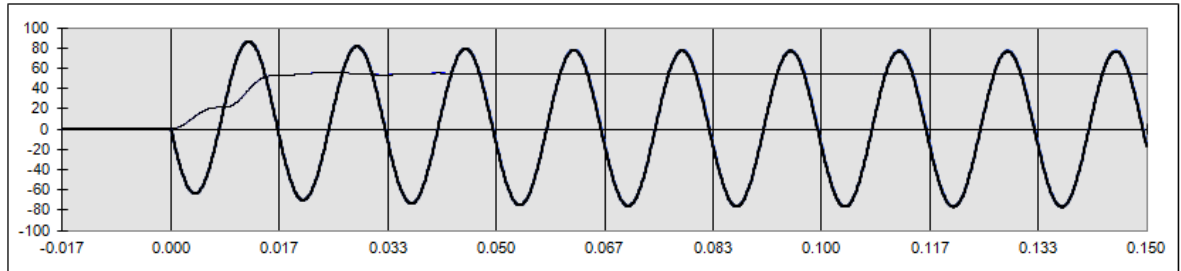
Figura 34. Onda secundaria real (negra) e ideal (azul) con $off = 0$



Fuente: IEEE PSRC committee, 2003a. CT SAT Calculator (PSRC).

- **Corriente secundaria entregada por el TC con ($off = 0.2$)**

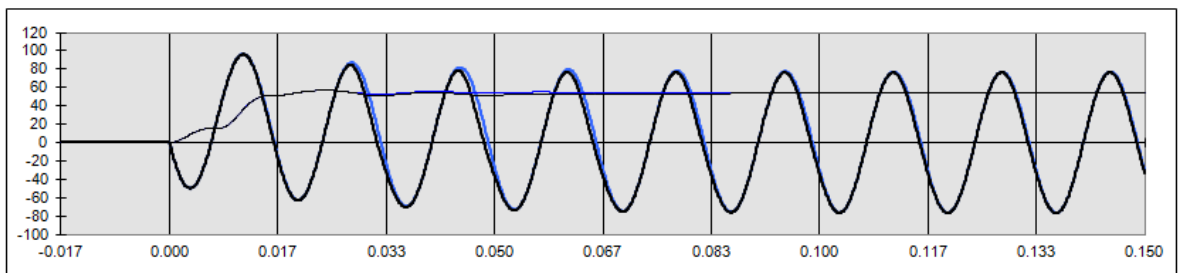
Figura 35. Onda secundaria real (negra) e ideal (azul) con $off = 0.2$



Fuente: IEEE PSRC committee, 2003a. CT SAT Calculator (PSRC).

- **Corriente secundaria entregada por el TC con ($off = 0.4$)**

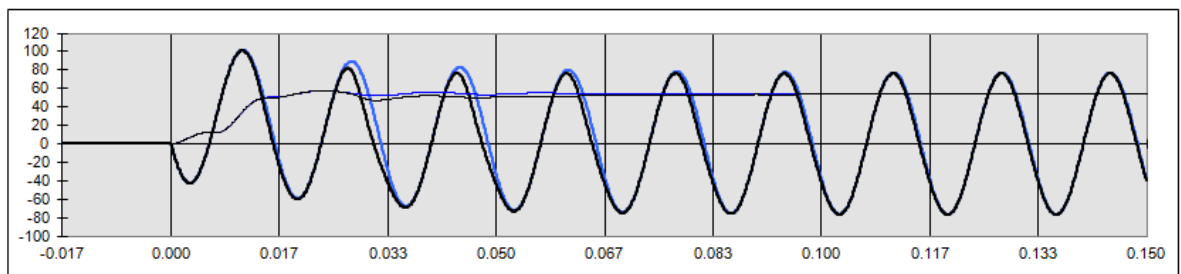
Figura 36. Onda secundaria real (negra) e ideal (azul) con $off = 0.4$



Fuente: IEEE PSRC committee, 2003a. CT SAT Calculator (PSRC).

- **Corriente secundaria entregada por el TC con ($off = 0.5$)**

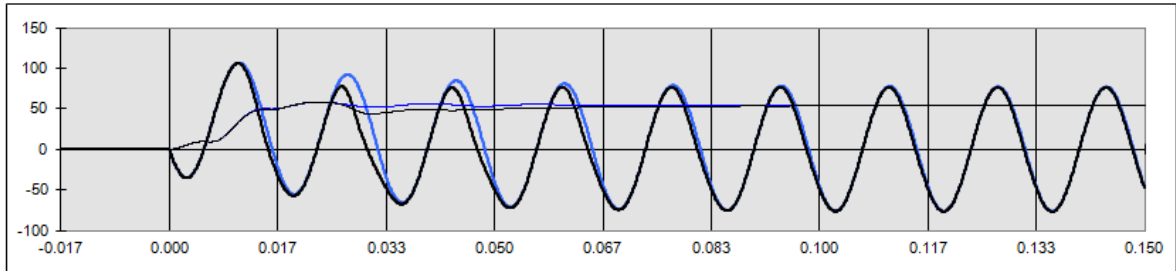
Figura 37. Onda secundaria real (negra) e ideal (azul) con $off = 0.5$



Fuente: IEEE PSRC committee, 2003a. CT SAT Calculator (PSRC).

- **Corriente secundaria entregada por el TC con ($off = 0.6$)**

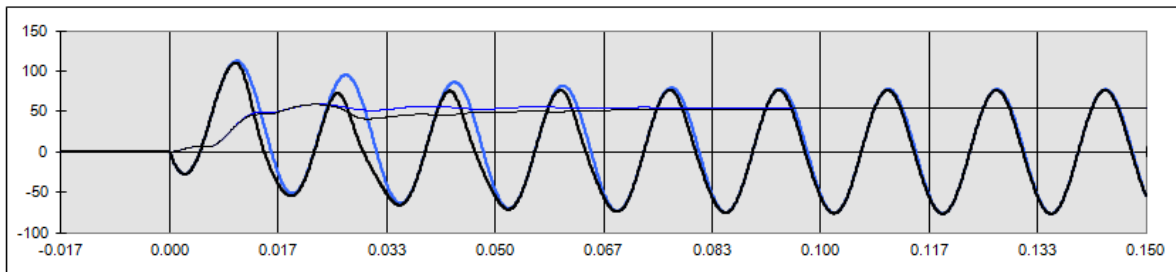
Figura 38. Onda secundaria real (negra) e ideal (azul) con $off = 0.6$



Fuente: IEEE PSRC committee, 2003a. CT SAT Calculator (PSRC).

- **Corriente secundaria entregada por el TC con ($off = 0.7$)**

Figura 39. Onda secundaria real (negra) e ideal (azul) con $off = 0.7$



Fuente: IEEE PSRC committee, 2003a. CT SAT Calculator (PSRC).

Como se puede observar en las formas de onda graficadas por el software de cálculo de saturación, a medida de que el offset es aumentado y teniendo la corriente de corto simétrica constante, la forma de onda secundaria comienza a distorsionarse y a verse afectada por el fenómeno de saturación en sus primeros ciclos mientras se disipa este nivel de DC en las componentes resistivas del circuito en análisis. Por lo que se evidencia que tener un grado elevado de offset en la corriente de falla tiene como consecuencia que se presente una posible saturación del transformador de corriente y que no refleje fielmente la magnitud de corriente que aparece en los bornes primarios del TC.

La otra parte del análisis se presenta cuando se varía el nivel de corriente simétrica de falla manteniendo el nivel de offset constante. El cuadro resumen con los datos se muestran en la Tabla 5.

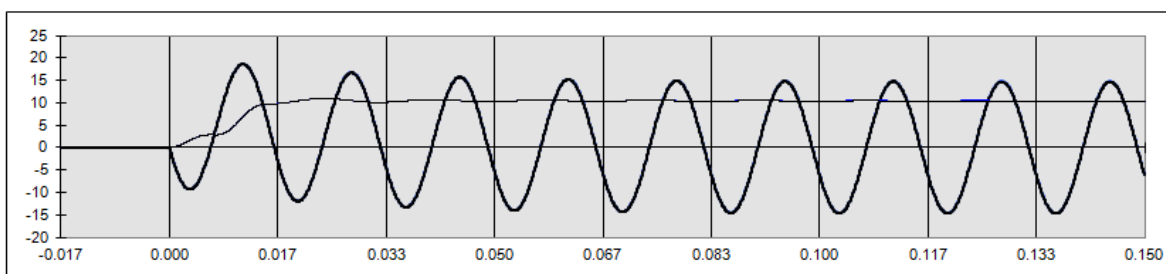
Tabla 5. Datos análisis de sensibilidad con I_{DC} constante

I_P (A)	I_{DC} Cte (A)	off (p.u)	I_a (A)
2500	1140	0.4149	2747.6535
7500	1140	0.15027	7586.14527
12500	1140	0.09082	12551.8764
18000	1140	0.06321	18036.06
20000	1140	0.05691	20032.4637
25000	1140	0.04555	25025.9785

En las siguientes Figuras 39, 40, 41, 42, 43 y 44 se ilustran las formas de onda graficadas por el software de cálculo, las cuales serian entregadas por el secundario del TC a los dispositivos de protección, para diferentes valores de corriente primaria simétrica manteniendo constante la magnitud de la componente DC de la corriente de falla total asimétrica.

- **Corriente secundaria entregada por el TC con ($I_P = 2500$)**

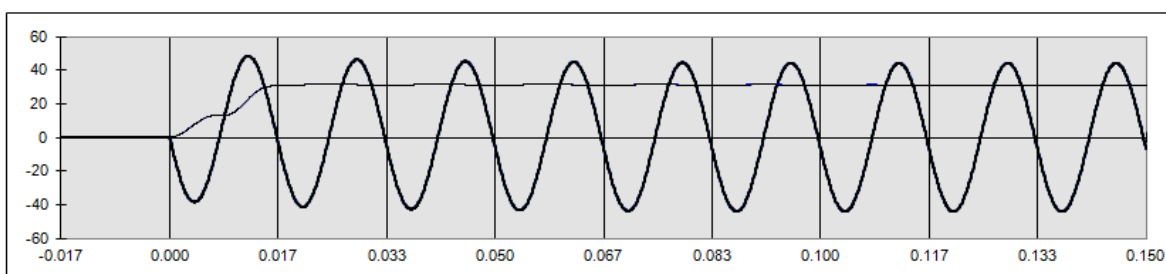
Figura 40. Onda secundaria real (negra) e ideal (azul) con $I_P = 2500$



Fuente: IEEE PSRC committee, 2003a. CT SAT Calculator (PSRC).

- **Corriente secundaria entregada por el TC con ($I_P = 7500$)**

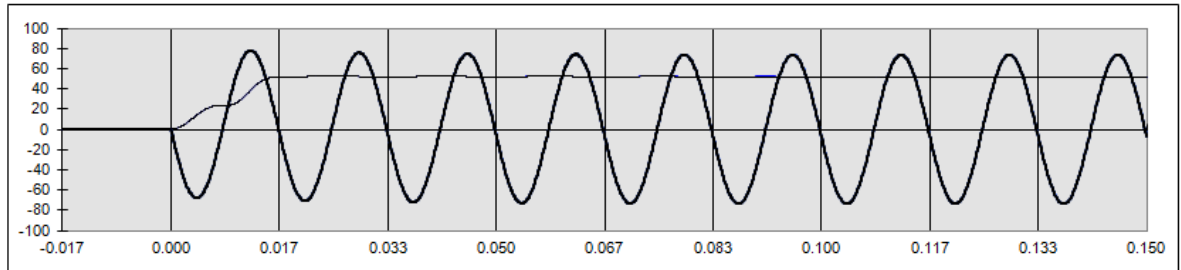
Figura 41. Onda secundaria real (negra) e ideal (azul) con $I_P = 7500$



Fuente: IEEE PSRC committee, 2003a. CT SAT Calculator (PSRC).

- **Corriente secundaria entregada por el TC con ($I_p = 12500$)**

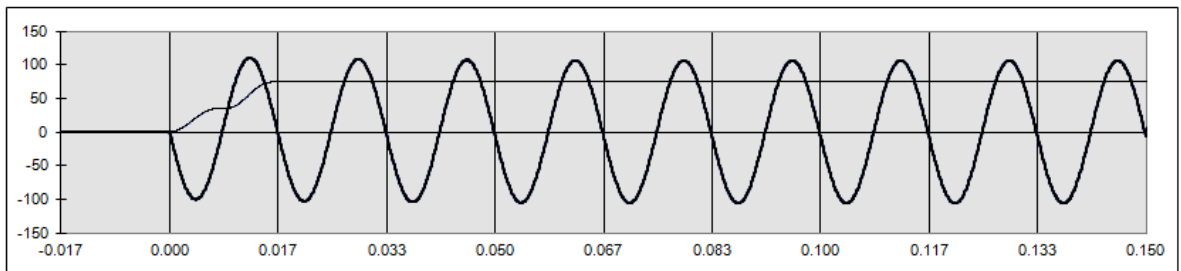
Figura 42. Onda secundaria real (negra) e ideal (azul) con $I_p = 12500$



Fuente: IEEE PSRC committee, 2003a. CT SAT Calculator (PSRC).

- **Corriente secundaria entregada por el TC con ($I_p = 18000$)**

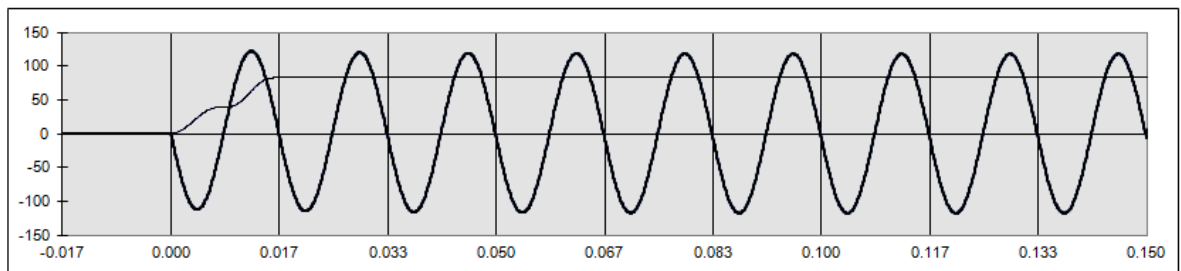
Figura 43. Onda secundaria real (negra) e ideal (azul) con $I_p = 18000$



Fuente: IEEE PSRC committee, 2003a. CT SAT Calculator (PSRC).

- **Corriente secundaria entregada por el TC con ($I_p = 20000$)**

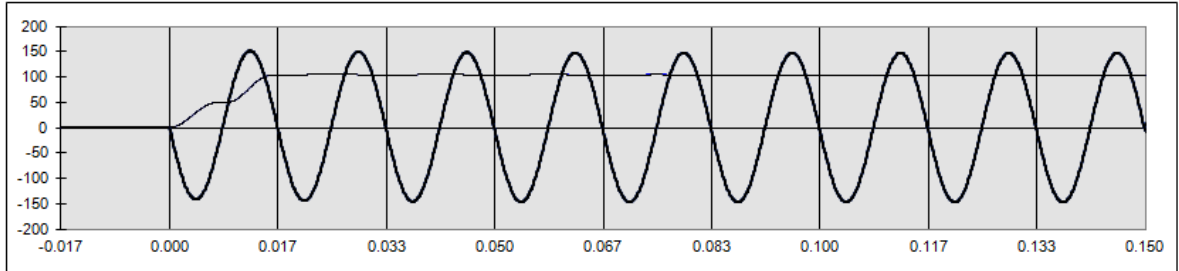
Figura 44. Onda secundaria real (negra) e ideal (azul) con $I_p = 20000$



Fuente: IEEE PSRC committee, 2003a. CT SAT Calculator (PSRC).

- **Corriente secundaria entregada por el TC con ($I_p = 25000$)**

Figura 45. Onda secundaria real (negra) e ideal (azul) con $I_p = 25000$



Fuente: IEEE PSRC committee, 2003a. CT SAT Calculator (PSRC).

Observando las formas de onda graficadas por el software de cálculo de saturación, a medida que la corriente de corto simétrica se aumenta, y teniendo el nivel de corriente DC constante, la forma de onda no se ve afectada por la saturación, esto debido a que como se muestra en la tabla 5, al variar la magnitud de corriente simétrica, el cálculo del offset DC también varía cada vez a un valor menor favoreciendo a la no presencia de saturación en el núcleo.

Con base en lo anterior se puede afirmar que la magnitud de corriente simétrica en el punto donde está conectado el TC representa una gran importancia en una posible saturación, principalmente cuando no se especifican correctamente los TC para los niveles de corto esperados en el punto de conexión, ya que si está mal seleccionado el TC o se encuentra en una relación de transformación más baja que la necesaria para el caso, el TC podría presentar una saturación inmediata.

CONCLUSIONES

- ❖ En el presente trabajo se planteó y se documentó la metodología para identificar la posible saturación en transformadores de corriente utilizados con fines de protección, haciendo uso de la herramienta del software de cálculo "*CT Saturation Theory and Calculator*".
- ❖ Los transformadores de corriente, además de medir la proporción exacta de corriente que aparece en el lado primario, sirven para conseguir una separación galvánica del circuito de alta y baja tensión, brindando seguridad a las personas y a los equipos de control, medida y protección.
- ❖ Se pudo observar en el transcurso del planteamiento de la metodología, que no se pudo obtener 2 parámetros, (S) y (Vs) asociados a la curva de excitación del TC de la forma como lo indica la teoría del software de cálculo, esto debido a que en la prueba de excitación para la obtención de la curva no se consideraron los puntos de medida de la zona de saturación en donde el TC alcanza los 10A de corriente de excitación de donde se obtienen estos 2 parámetros.
- ❖ Se comprobó para el cálculo de saturación, que las formas de onda entregadas por el software de cálculo no presentan un cambio considerable en el momento de variar el valor del inverso de la pendiente de la zona de saturación (S) en la curva de excitación del TC, por lo que se concluye que el resultado del cálculo de saturación para este caso en particular no es sensible al cambio del valor de S, por esto se decidió trabajar con un valor (S=20) tomado de la curva de excitación típica para un TC multi-relación clase C de características similares al TC en estudio tomada de la norma IEEE Std C37.110-2007.
- ❖ Los parámetros que pueden generar un error excesivo en el reflejo de la corriente primaria en el secundario del TC, son la magnitud de la corriente de falla, la carga asociada al devanado secundario, la relación X/R del circuito, la remanencia presente en el núcleo y el nivel de DC de la corriente de falla
- ❖ Se pudo observar por medio del análisis de sensibilidad que el nivel de offset o desplazamiento de la forma de onda es uno de los parámetros que puede introducir una distorsión mas importante en la forma de onda

entregada a los dispositivos de protección como se reflejó a medida que se iba aumentando el nivel de offset presente en la corriente de falla.

- ❖ Se puede concluir que con los parámetros asociados al sistema de potencia donde se encuentra conectado el TC y los parámetros propios del TC al cual se le realizó la comprobación de saturación por medio de la metodología planteada, que el TC no llegaría a presentar el fenómeno de saturación magnética del núcleo.
- ❖ Se considera que es perfectamente válido usar la simulación simplificada de “*Saturation Theory and Calculator*” para garantizar el correcto funcionamiento de los dispositivos de protección asociados al secundario del TC bajo altas corrientes de cortocircuito y que el cálculo de saturación y la metodología planteada proporciona herramientas necesarias para validar la selección de un TC en una aplicación en particular.

BIBLIOGRAFIA

GONZÁLEZ, G.G. & URIAS, E.O.L., 2010. *Índice General Índice General Índice de Figuras*.

IEEE PSRC committee, 2003. CT SAT Calculator (PSRC).

Kisan, M. et al., 2003. IEC std 60 044-1.

Ramirez, S., 2005. *Protección de Sistemas Eléctricos*,

ROMERO, A.M. & OCTAVO, R.F.O., 2012. *Revisión y Especificación de Capacidades*.

System, P. et al., 2008. IEEE Std C37.110'-2007, IEEE Guide for the Application of Current Transformers Used for Protective Relaying Purposes. , 2007(April).

Systems, P. et al., 2007. IEEE Guide for Field Testing of Relaying. , (February).

Wikipedia, 2014. Magnetic Tape Storage and Handling. Available at: <http://www.clir.org/pubs/reports/pub54/glossary.html> [Accessed July 20, 2015].

ANEXOS

Anexo A. Curva de saturación con los puntos de medida.

\\MELENDEZ\AGUABLANCA\MELE_AGUA_FR_87B_EXC.xml:

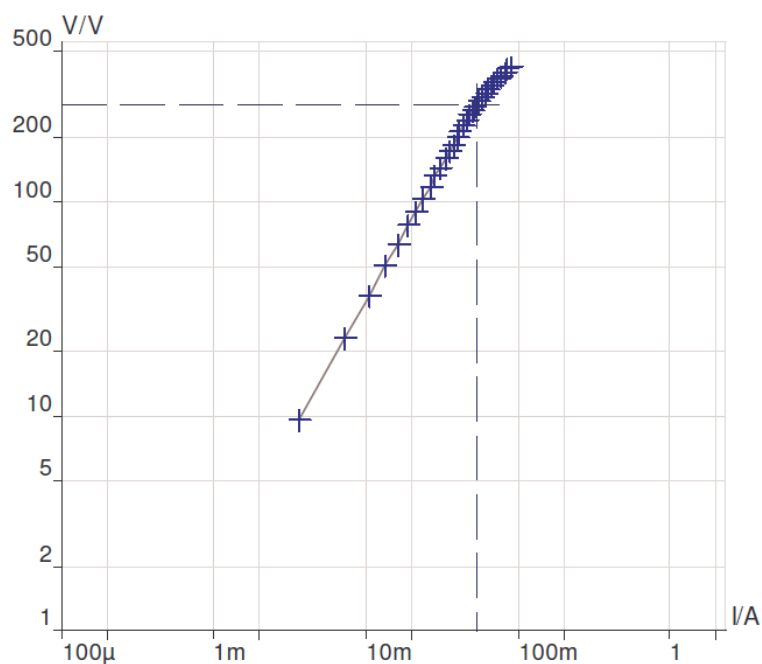
Test Device: CPC 100
 Serial Number: EG501F (V1)
 Date/Time: 03/24/2013 11:54:34
 Overall assessment: n/a

Test Cards:


EXCITACION:

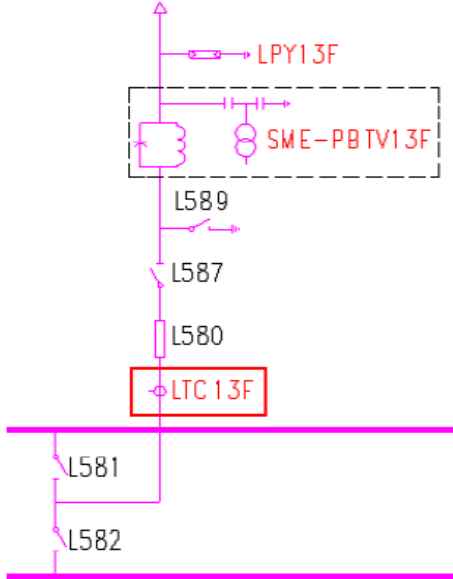
Card Type: CTExcitation
 Date/Time: 03/24/2013 11:51:48
 Overload: no
 Assessment: n/a
 V max: 500.0 V
 I max: 1.50000 A
 Frequency: 60.00 Hz
 Automatic: yes
 Results:


V	I
427.49 V	90.197 mA
414.08 V	84.592 mA
400.55 V	81.810 mA
387.17 V	78.677 mA
373.82 V	73.958 mA
360.37 V	69.588 mA
346.95 V	66.444 mA
333.46 V	64.170 mA
320.00 V	61.519 mA
306.61 V	57.816 mA
293.16 V	54.611 mA
279.65 V	52.043 mA
266.20 V	49.841 mA
252.69 V	47.792 mA
239.18 V	45.821 mA
225.71 V	43.810 mA
212.21 V	41.722 mA
198.68 V	39.638 mA
185.20 V	37.528 mA
171.69 V	35.372 mA
158.17 V	33.194 mA
144.67 V	30.975 mA
131.16 V	28.695 mA
117.64 V	26.366 mA
104.14 V	23.946 mA
90.62 V	21.467 mA
77.11 V	18.921 mA
63.60 V	16.265 mA
50.09 V	13.482 mA
36.59 V	10.551 mA
23.07 V	7.3470 mA
9.55 V	3.6750 mA




Anexo B. Catalogo: Equipos en Subestaciones-Distribución.

TRANSFORMADOR DE CORRIENTE-CARACTERISTICAS TECNICAS / REGISTRO FOTOGRAFICO		
Relacion Transformacion de Corriente DEV 1	100/200/300/400/600/800/1000/1200/5A	
Relacion Transformacion de Corriente DEV 2	100/200/300/400/600/800/1000/1200/5A	
Relacion Transformacion de Corriente DEV 3	100/200/300/400/600/800/1000/1200/5A	
Relacion Transformacion de Corriente DEV 4	100/200/300/400/600/800/1000/1200/5A	
Relacion Transformacion de Corriente DEV 5	NO APLICA	
Relacion Transformacion de Corriente DEV 6	NO APLICA	
Cargabilidad DEV 1 [VA]	NO CONTIENE INFORMACION	
Cargabilidad DEV 2 [VA]	NO CONTIENE INFORMACION	
Cargabilidad DEV 3 [VA]	NO CONTIENE INFORMACION	
Cargabilidad DEV 4 [VA]	NO CONTIENE INFORMACION	
Cargabilidad DEV 5 [VA]	NO APLICA	
Cargabilidad DEV 6 [VA]	NO APLICA	

EPSA	Catalogo: Equipos en Subestaciones- Distribucion	TRANSFORMADOR DE CORRIENTE AGUABLANCA-AGBSME51
	Grupo: Transformadores de Corriente	
TRANSFORMADOR DE CORRIENTE-DATOS GENERALES / DIAGRAMA UNIFILAR		
Instalacion Origen	Melendez(SME-115/34.5/13.2kV)	<div>AGUABLANCA AGBSME51</div> 
Zona o Sector de la Empresa	SUR	
Nombre del Equipo	NO CONTIENE INFORMACION	
Posicion [SMT]	AGUABLANCA-AGBSME51	
Matricula	NO CONTIENE INFORMACION	
Marca del Equipo	ASEA	
Tipo de Equipo	IMBD 145 A4	
Numero de Serie	7334216/7/8	
Año de Fabricacion	NO CONTIENE INFORMACION	
Fecha de Puesta en Servicio	NO CONTIENE INFORMACION	
Codigo BDI		
Propiedad	EPSA	
Catalogo	NO CONTIENE INFORMACION	
Numero de Proyecto	NO CONTIENE INFORMACION	

EPSA	Catalogo: Equipos en Subestaciones-Distribucion	TRANSFORMADOR DE CORRIENTE AGUABLANCA-AGBSME51
	Grupo: Transformadores de Corriente	
TRANSFORMADOR DE CORRIENTE-CARACTERISTICAS TECNICAS / REGISTRO FOTOGRAFICO		
Clase Precision Medida	0.3B1.0	
Clase Precision Proteccion	C100	
BIL [kV]	650	
Clase de Aislamiento	ACEITE	
Tension Nominal [kV]	145	
Tension Maxima [kV]	NO CONTIENE INFORMACION	
Corriente Nominal [kA]	1.2	
Corriente Dinamica [kA]	150	
Corriente Termica [kA/1s]	60	



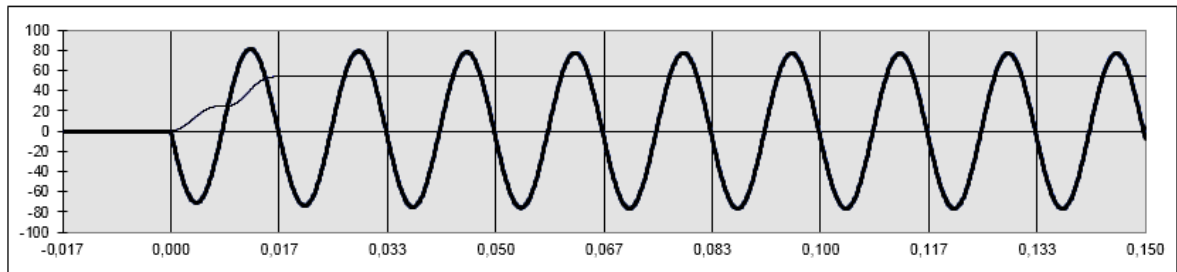
TRANSFORMADOR DE CORRIENTE / REGISTRO FOTOGRAFICO



EPSA	Catalogo: Equipos en Subestaciones- Distribucion	TRANSFORMADOR DE CORRIENTE AGUABLANCA-AGBSME51
	Grupo: Transformadores de Corriente	
TRANSFORMADOR DE CORRIENTE / REGISTRO FOTOGRAFICO		
		
OBSERVACIONES		

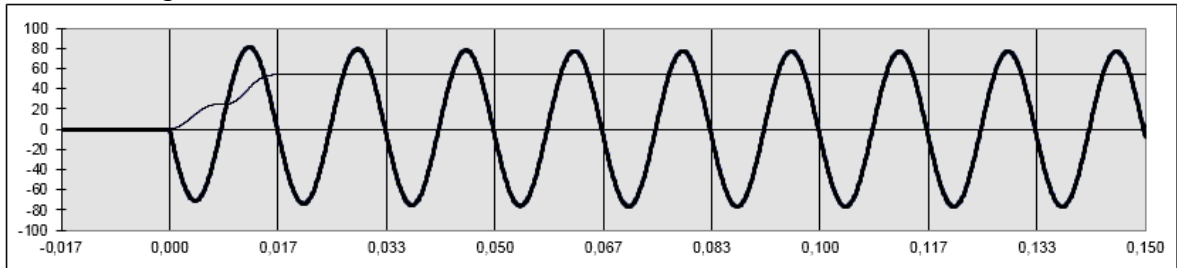
Anexo C. Análisis de la influencia (S) sobre la forma de onda entregada por el TC.

Figura 46. Forma de onda de la corriente secundaria con S=15



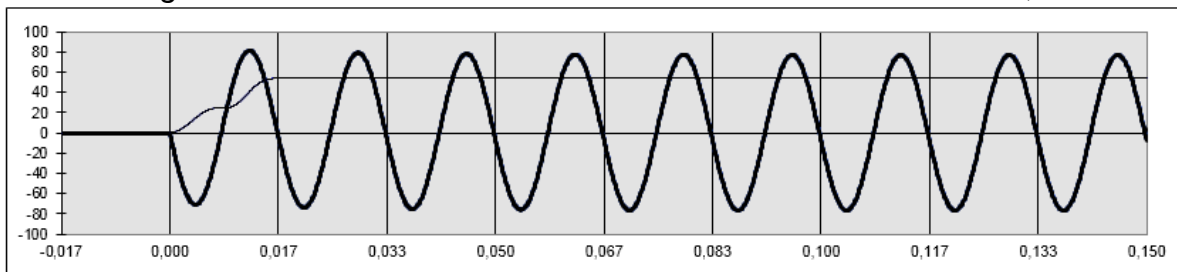
Fuente: IEEE PSRC committee, 2003a. CT SAT Calculator (PSRC).

Figura 47. Forma de onda de la corriente secundaria con S=15,3



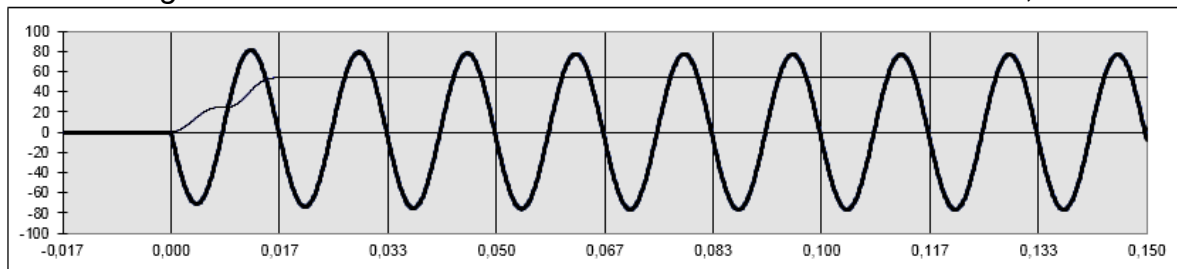
Fuente: IEEE PSRC committee, 2003a. CT SAT Calculator (PSRC).

Figura 48. Forma de onda de la corriente secundaria con S=15,6



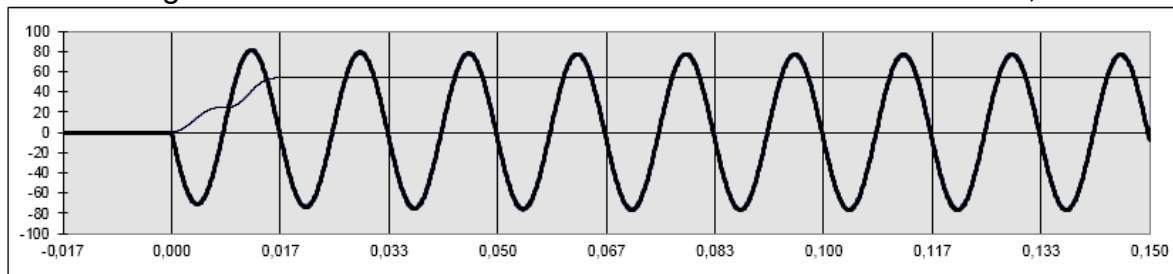
Fuente: IEEE PSRC committee, 2003a. CT SAT Calculator (PSRC).

Figura 49. Forma de onda de la corriente secundaria con S=15,9



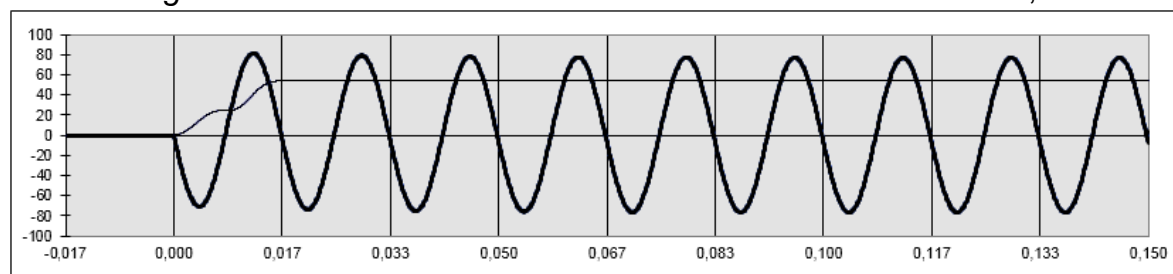
Fuente: IEEE PSRC committee, 2003a. CT SAT Calculator (PSRC).

Figura 50. Forma de onda de la corriente secundaria con $S=16,2$



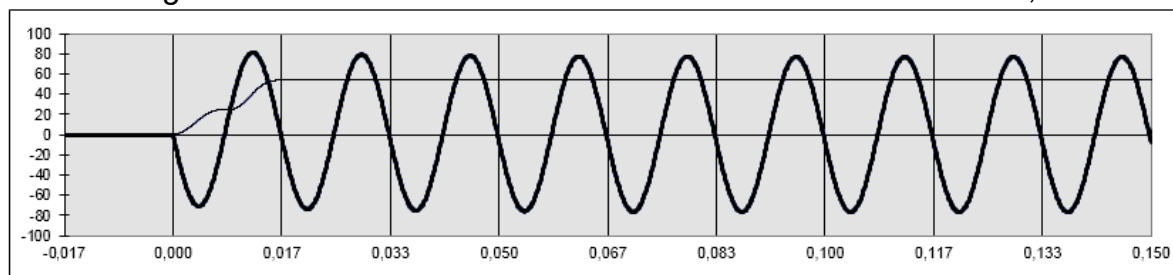
Fuente: IEEE PSRC committee, 2003a. CT SAT Calculator (PSRC).

Figura 51. Forma de onda de la corriente secundaria con $S=16,5$



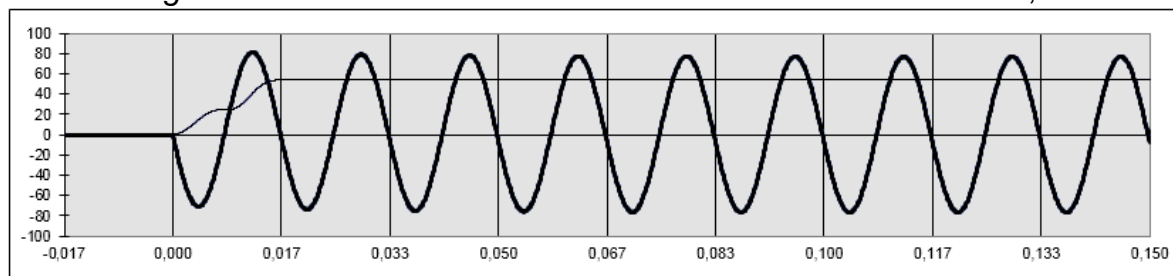
Fuente: IEEE PSRC committee, 2003a. CT SAT Calculator (PSRC).

Figura 52. Forma de onda de la corriente secundaria con $S=16,8$



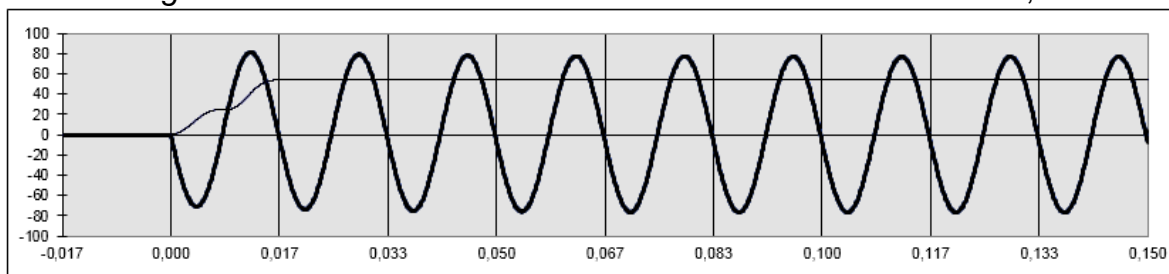
Fuente: IEEE PSRC committee, 2003a. CT SAT Calculator (PSRC).

Figura 53. Forma de onda de la corriente secundaria con $S=17,1$



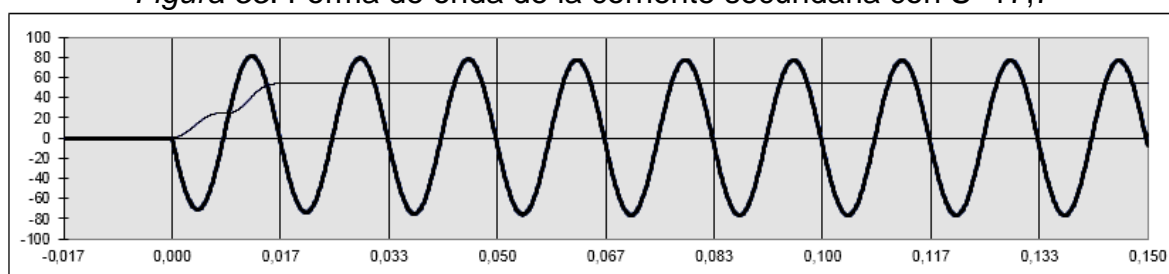
Fuente: IEEE PSRC committee, 2003a. CT SAT Calculator (PSRC).

Figura 54. Forma de onda de la corriente secundaria con $S=17,4$



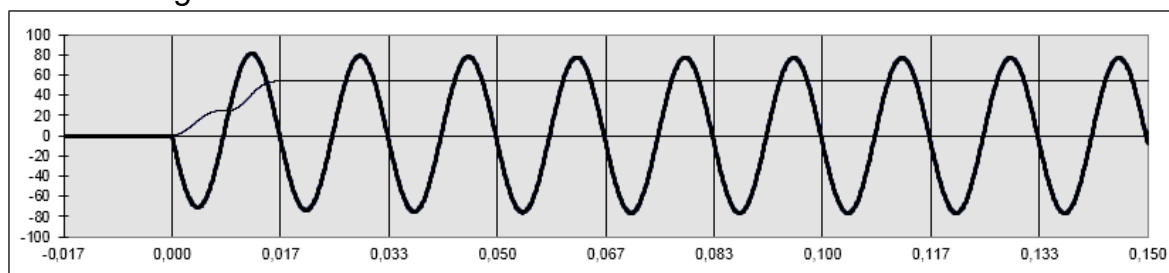
Fuente: IEEE PSRC committee, 2003a. CT SAT Calculator (PSRC).

Figura 55. Forma de onda de la corriente secundaria con $S=17,7$



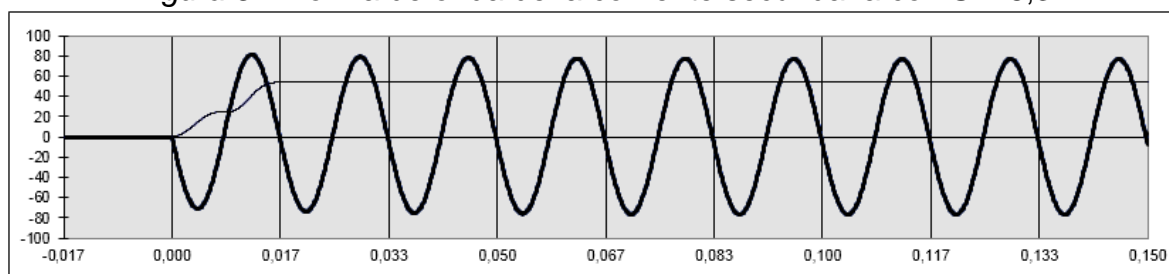
Fuente: IEEE PSRC committee, 2003a. CT SAT Calculator (PSRC).

Figura 56. Forma de onda de la corriente secundaria con $S=18$



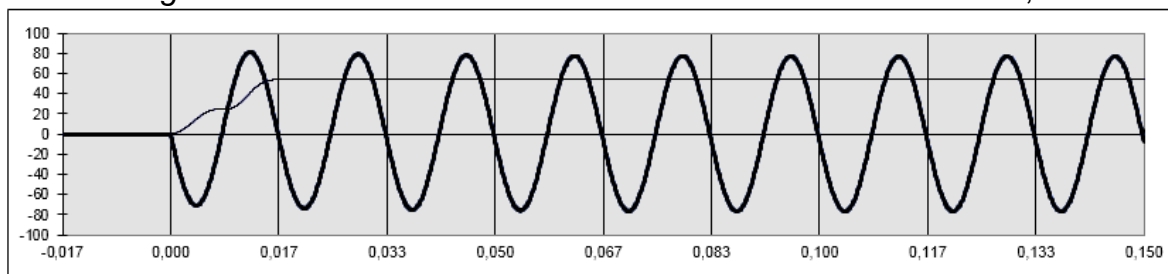
Fuente: IEEE PSRC committee, 2003a. CT SAT Calculator (PSRC).

Figura 57. Forma de onda de la corriente secundaria con $S=18,3$



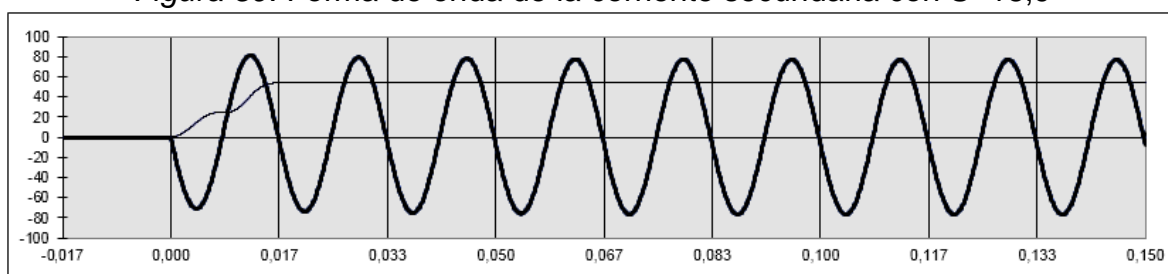
Fuente: IEEE PSRC committee, 2003a. CT SAT Calculator (PSRC).

Figura 58. Forma de onda de la corriente secundaria con S=18,6



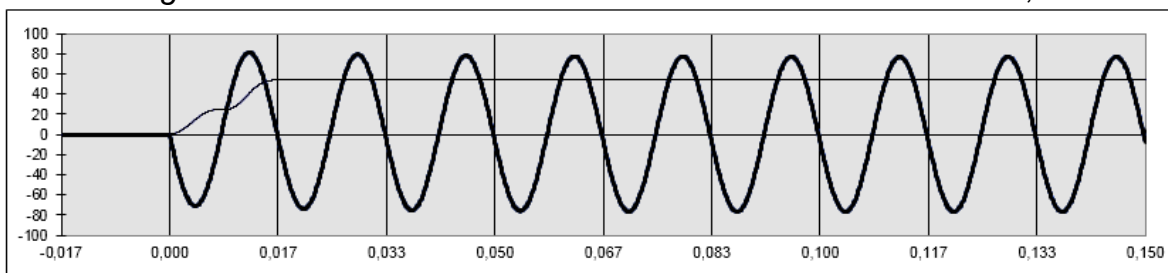
Fuente: IEEE PSRC committee, 2003a. CT SAT Calculator (PSRC).

Figura 59. Forma de onda de la corriente secundaria con S=18,9



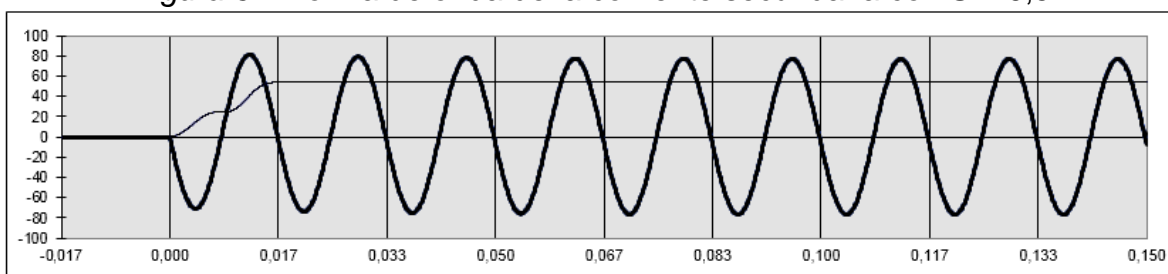
Fuente: IEEE PSRC committee, 2003a. CT SAT Calculator (PSRC).

Figura 60. Forma de onda de la corriente secundaria con S=19,2



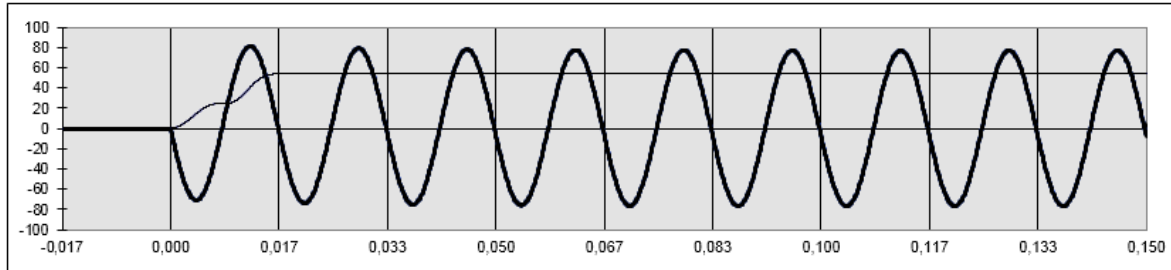
Fuente: IEEE PSRC committee, 2003a. CT SAT Calculator (PSRC).

Figura 61. Forma de onda de la corriente secundaria con S=19,5



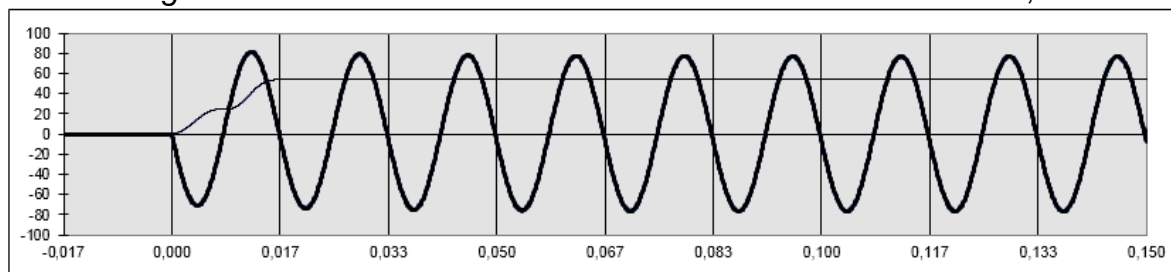
Fuente: IEEE PSRC committee, 2003a. CT SAT Calculator (PSRC).

Figura 62. Forma de onda de la corriente secundaria con $S=19,8$



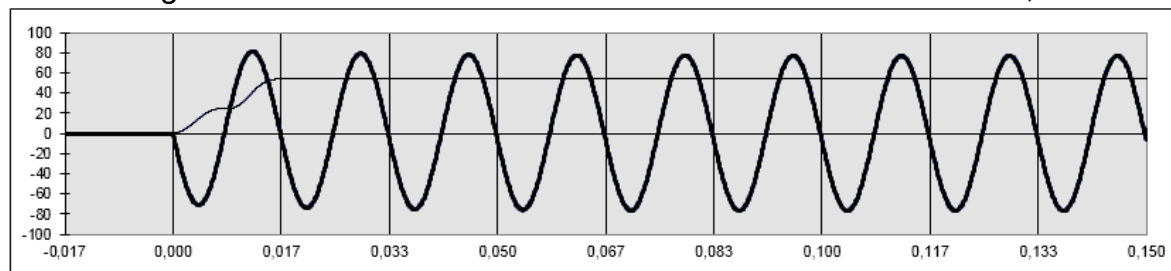
Fuente: IEEE PSRC committee, 2003a. CT SAT Calculator (PSRC).

Figura 63. Forma de onda de la corriente secundaria con $S=20,1$



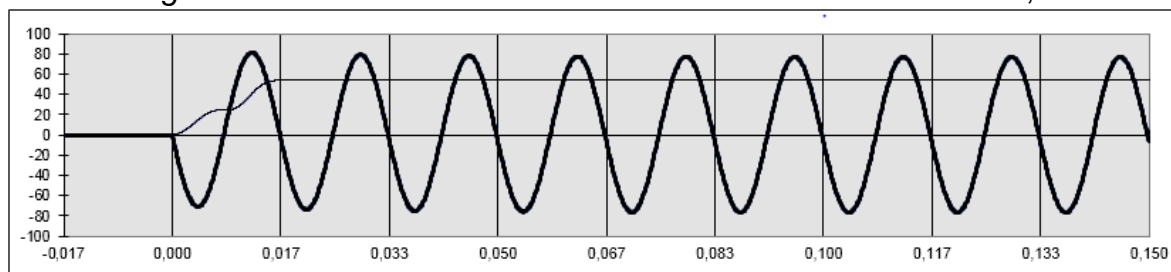
Fuente: IEEE PSRC committee, 2003a. CT SAT Calculator (PSRC).

Figura 64. Forma de onda de la corriente secundaria con $S=20,4$



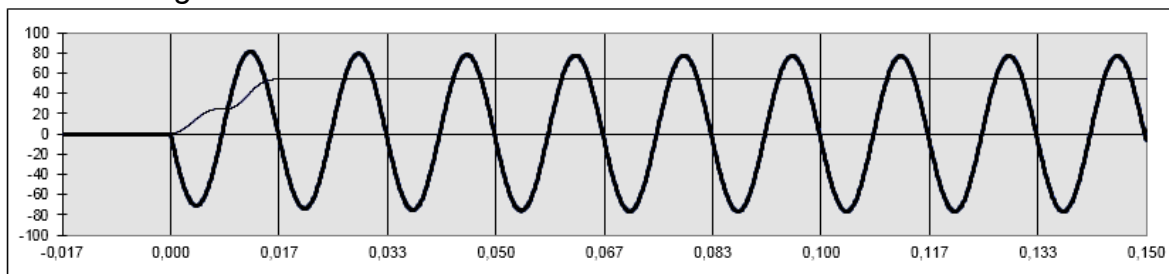
Fuente: IEEE PSRC committee, 2003a. CT SAT Calculator (PSRC).

Figura 65. Forma de onda de la corriente secundaria con $S=20,7$



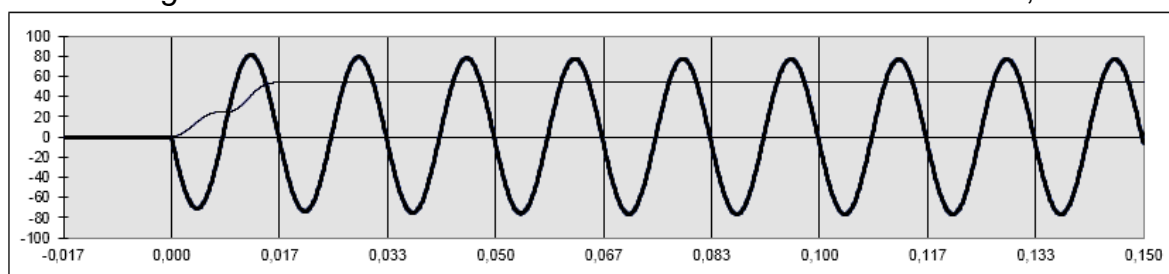
Fuente: IEEE PSRC committee, 2003a. CT SAT Calculator (PSRC).

Figura 66. Forma de onda de la corriente secundaria con S=21



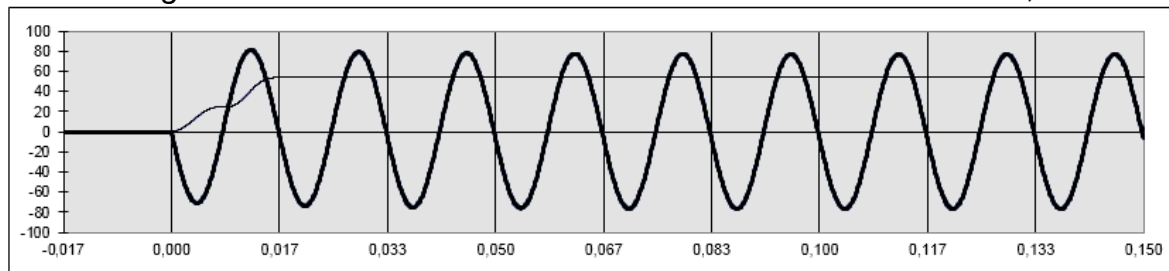
Fuente: IEEE PSRC committee, 2003a. CT SAT Calculator (PSRC).

Figura 67. Forma de onda de la corriente secundaria con S=21,3



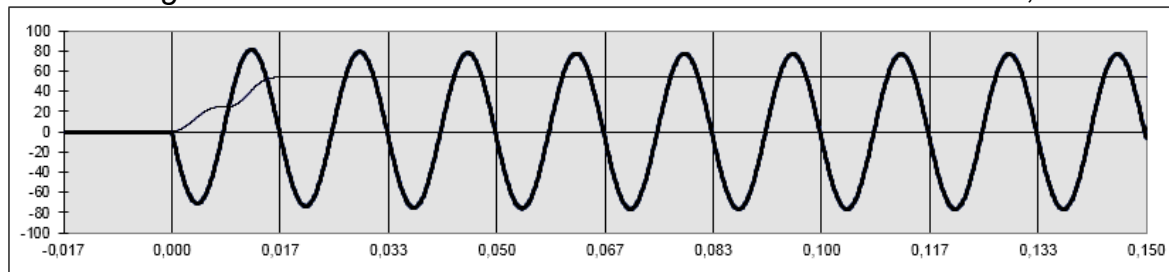
Fuente: IEEE PSRC committee, 2003a. CT SAT Calculator (PSRC).

Figura 68. Forma de onda de la corriente secundaria con S=21,6



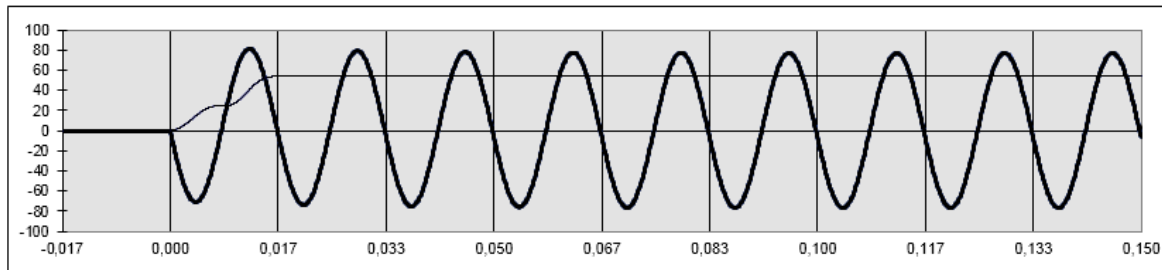
Fuente: IEEE PSRC committee, 2003a. CT SAT Calculator (PSRC).

Figura 69. Forma de onda de la corriente secundaria con S=21,9



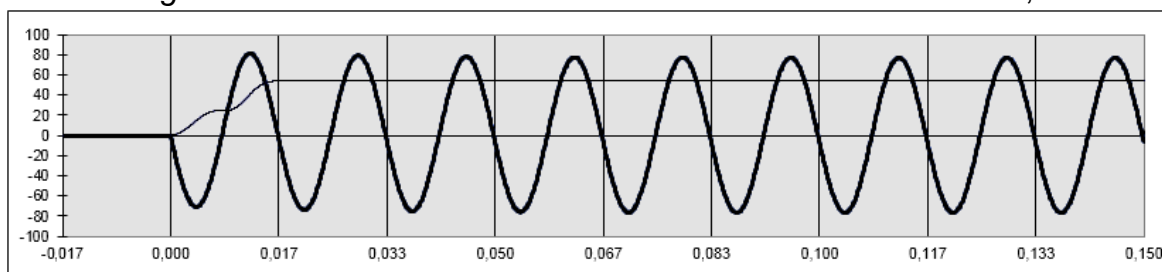
Fuente: IEEE PSRC committee, 2003a. CT SAT Calculator (PSRC).

Figura 70. Forma de onda de la corriente secundaria con $S=22,2$



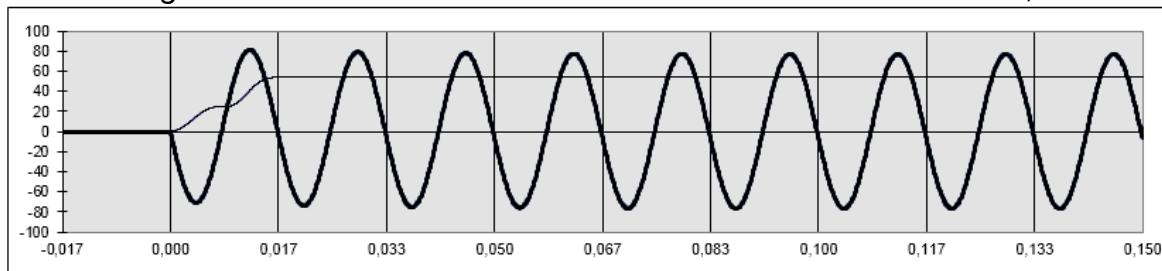
Fuente: IEEE PSRC committee, 2003a. CT SAT Calculator (PSRC).

Figura 71. Forma de onda de la corriente secundaria con $S=22,5$



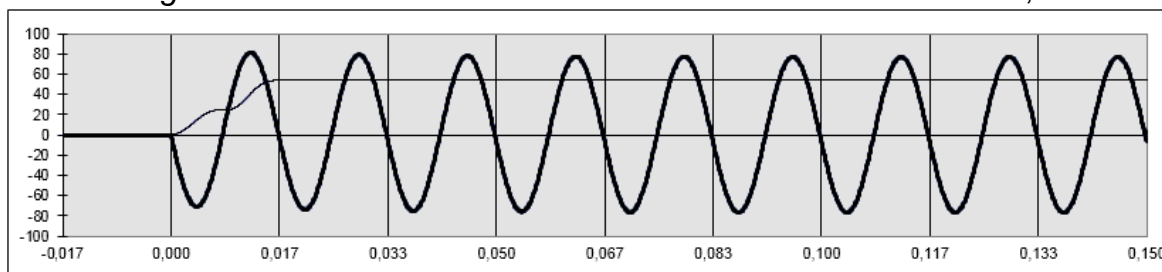
Fuente: IEEE PSRC committee, 2003a. CT SAT Calculator (PSRC).

Figura 72. Forma de onda de la corriente secundaria con $S=22,8$



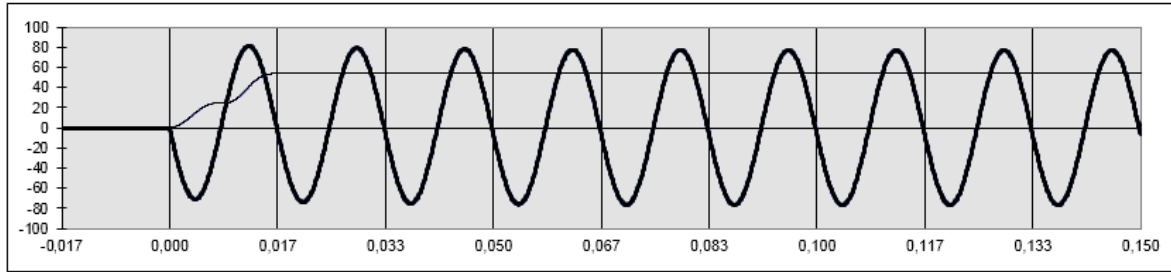
Fuente: IEEE PSRC committee, 2003a. CT SAT Calculator (PSRC).

Figura 73. Forma de onda de la corriente secundaria con $S=23,1$



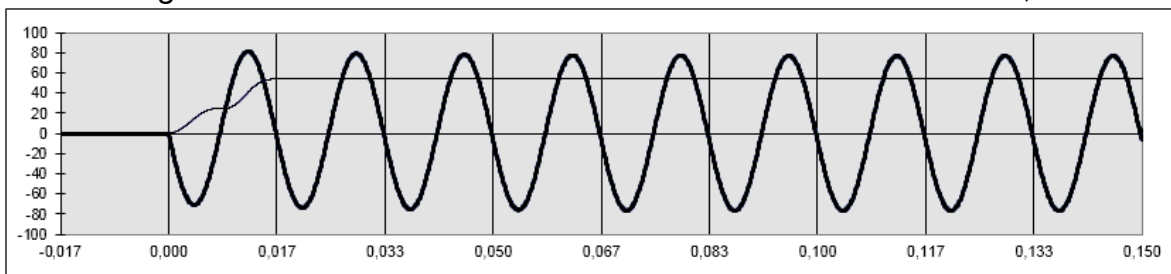
Fuente: IEEE PSRC committee, 2003a. CT SAT Calculator (PSRC).

Figura 74. Forma de onda de la corriente secundaria con $S=23,4$



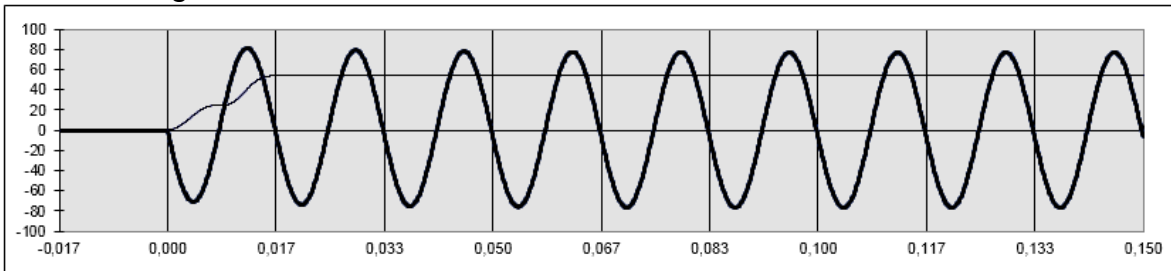
Fuente: IEEE PSRC committee, 2003a. CT SAT Calculator (PSRC).

Figura 75. Forma de onda de la corriente secundaria con $S=23,7$



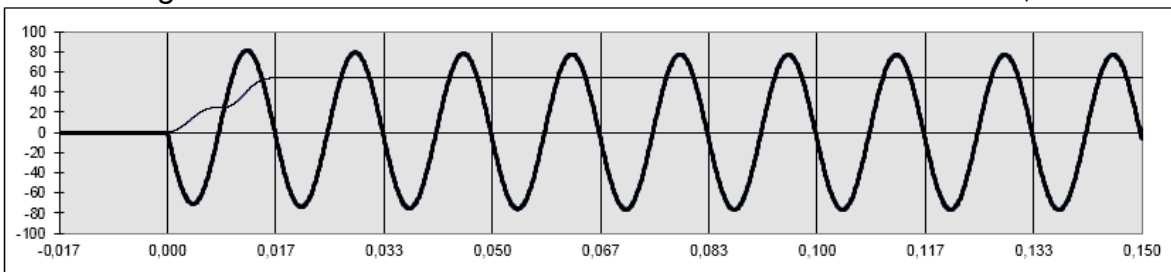
Fuente: IEEE PSRC committee, 2003a. CT SAT Calculator (PSRC).

Figura 76. Forma de onda de la corriente secundaria con $S=24$



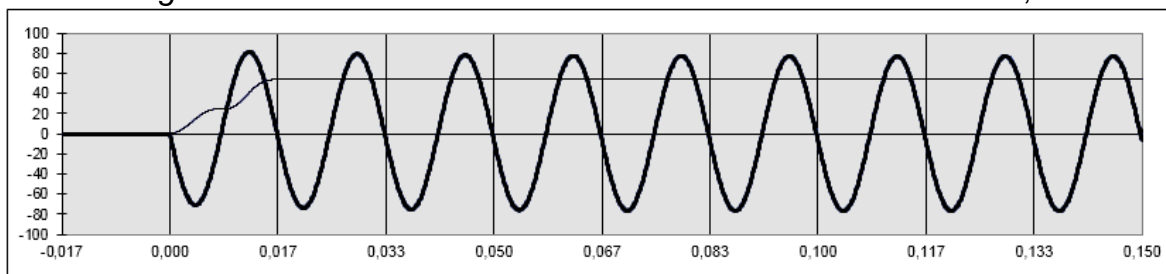
Fuente: IEEE PSRC committee, 2003a. CT SAT Calculator (PSRC).

Figura 77. Forma de onda de la corriente secundaria con $S=24,3$



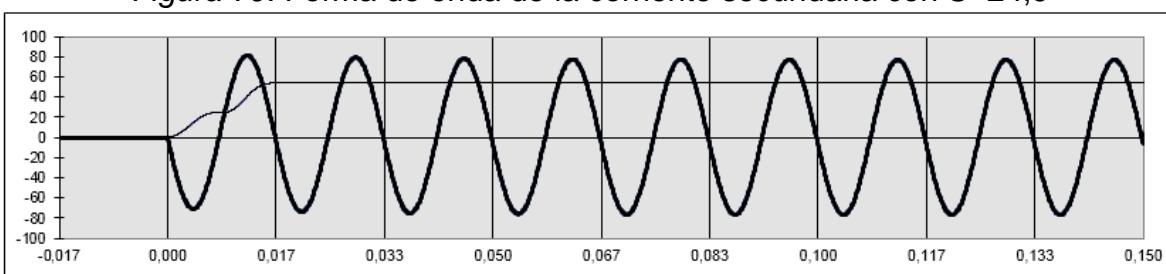
Fuente: IEEE PSRC committee, 2003a. CT SAT Calculator (PSRC).

Figura 78. Forma de onda de la corriente secundaria con S=24,6



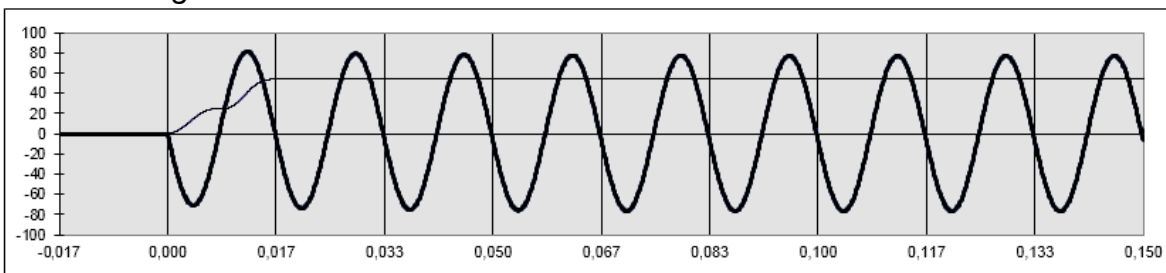
Fuente: IEEE PSRC committee, 2003a. CT SAT Calculator (PSRC).

Figura 79. Forma de onda de la corriente secundaria con S=24,9



Fuente: IEEE PSRC committee, 2003a. CT SAT Calculator (PSRC).

Figura 80. Forma de onda de la corriente secundaria con S=25



Fuente: IEEE PSRC committee, 2003a. CT SAT Calculator (PSRC).

Figura 81. Foto de la obtención del parámetro S a partir de la curva de excitación típica para un TC multi-relacion clase C

