

**ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DE LAS CORRIENTES INRUSH EN LOS
TRANSFORMADORES DE DISTRIBUCIÓN A PARTIR DE SU COMPORTAMIENTO
TRANSITORIO EMPLEANDO SOFTWARE DE SIMULACIÓN ESPECIALIZADO**

**CRISTIAN E. GONZÁLEZ
JOSÉ C. MORENO**

**INSTITUCIÓN UNIVERSITARIA PASCUAL BRAVO
FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA
INGENIERÍA ELÉCTRICA
MEDELLÍN
2024**

**ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DE LAS CORRIENTES INRUSH EN LOS
TRANSFORMADORES DE DISTRIBUCIÓN A PARTIR DE SU COMPORTAMIENTO
TRANSITORIO EMPLEANDO SOFTWARE DE SIMULACIÓN ESPECIALIZADO.**

CRISTIAN E. GONZÁLEZ

JOSÉ C. MORENO

Trabajo de grado para optar al título de ingeniería eléctrica

asesores:

Santiago Bustamante, Msc.

Ingry Natalia Gómez, PhD

INSTITUCIÓN UNIVERSITARIA PASCUAL BRAVO

FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

MEDELLÍN

2024.

Contenido

Introducción	17
1. Planteamiento de Problema.....	18
1.1. Descripción	18
1.2. Formulación	19
2. Justificación	20
3. Objetivos.....	22
3.1. Objetivo General.....	22
3.2. Objetivos Específicos.....	22
4. Marco teórico	23
4.1. Transformadores Eléctricos	23
4.1.1. Principio de funcionamiento de un transformador.....	24
4.1.2. Energización de Transformador.....	25
4.1.3. Tipos de Transformadores.....	26
4.2. Corriente Inrush.....	31
4.2.1. Esfuerzos electromecánicos en transformadores causados por la corriente de Inrush.	32
4.2.2. Factores que afectan a la corriente Inrush.....	32
4.3. Generación de la corriente Inrush.....	33
4.4. Generación de la corriente Sympathetic Inrush	37

5.	Metodología	41
5.1.	Tipo de proyecto	41
5.2.	Método	41
5.3.	Instrumentos de recolección de información	42
5.3.1.	Revisión documental.....	42
6.	Resultados del proyecto	43
6.1.	Transformador monofásico de 37.5kVA saturable.....	43
6.1.1.	Cálculos en AT.	46
6.1.2.	Cálculos en BT.....	48
6.1.3.	Rama de magnetización.	49
6.1.4.	Configuración del simulador.....	50
6.1.5.	Simulación del transformador.....	57
6.2.	Transformador monofásico de 150kVA saturable.....	64
6.2.1.	Cálculos en AT.	66
6.2.2.	Cálculos en BT.....	67
6.2.3.	Rama de magnetización.	68
6.2.4.	Configuración del simulador.....	70
6.2.5.	Simulación del transformador.....	77
7.	Conclusiones.....	92
7.1.	Transformador 37.5kVA	92

7.2. Transformador de 150kVA.....	93
8. Recomendaciones	96
9. Referencias bibliográficas.....	98
10. Anexos	¡Error! Marcador no definido.

Lista de figuras

<i>Figura 1.</i> Transformador de potencia.	27
<i>Figura 2.</i> Transformador trifásico.....	29
<i>Figura 3.</i> Transformador monofásico.	30
<i>Figura 4.</i> Flujo magnético.	36
<i>Figura 5.</i> Curva de magnetización y la generación de la corriente Inrush.	37
<i>Figura 6.</i> Circuito simple de dos transformadores en paralelo.....	38
<i>Figura 7.</i> modelo constructivo del transformador monofásico de 37.5kVA	44
<i>Figura 8.</i> Datos de placa de transformador monofásico de 37.5kVA.....	45
<i>Figura 9.</i> Modelo de transformador de baja frecuencia.	46
<i>Figura 10.</i> Modelado en programa de transformador monofásico de 37.5kVA.....	51
<i>Figura 11.</i> Fuente de EPM 7620V.	52
<i>Figura 12.</i> Probador de voltaje.	53
<i>Figura 13.</i> Switch (S1) para control de apertura y cierre de línea.....	53
<i>Figura 14.</i> Probador de corriente.....	54
<i>Figura 15.</i> Datos del transformador.....	54
<i>Figura 16.</i> Datos de saturación visto desde el AT (datos tomados de la tabla 3).	55
<i>Figura 17.</i> Grafica de saturación del núcleo del transformador de 37.5kVA.	55
<i>Figura 18.</i> Switch (S2) para control de apertura y cierre de carga.	56
<i>Figura 19.</i> Simulación de carga del sistema.	56
<i>Figura 20.</i> Grafica de corriente Inrush con carga en vacío.	57
<i>Figura 21.</i> Ampliación del pico de corriente Inrush.....	57

<i>Figura 22.</i> Ampliación a corriente de estabilización (carga en vacío).	59
<i>Figura 23.</i> Armónicos de la corriente Inrush con carga en vacío.	59
<i>Figura 24.</i> Grafica de corriente Inrush con carga al 100%.	60
<i>Figura 25.</i> Ampliación a corriente de estabilización (carga al 100%).	60
<i>Figura 26.</i> Armónicos de la corriente Inrush con carga al 100%.	61
<i>Figura 27.</i> Tiempo de cierre para el switch (S1).	61
<i>Figura 28.</i> Grafica de corriente Inrush con carga en vacío y tiempo de accionamiento de S1. ...	62
<i>Figura 29.</i> Armónicos de la corriente Inrush con carga en vacío y tiempo de accionamiento de S1.	63
<i>Figura 30.</i> Grafica de corriente Inrush con carga al 100% y tiempo de accionamiento de S1. ...	63
<i>Figura 31.</i> Armónicos de la corriente Inrush con carga al 100% y tiempo de accionamiento de S1.	64
<i>Figura 32.</i> Modelo de transformador de baja frecuencia.	65
<i>Figura 33.</i> Modelado en programa de transformador monofásico de 150kVA.	70
<i>Figura 34.</i> Fuente de EPM 13200V.	72
<i>Figura 35.</i> Probador de voltaje.	72
<i>Figura 36.</i> Switch (S1, S2 y S3) para control de apertura y cierre de línea.	73
<i>Figura 37.</i> Probador de corriente.	74
<i>Figura 38.</i> Datos del transformador.	74
<i>Figura 39.</i> Datos de saturación visto desde el AT (datos tomados de la tabla 3).	75
<i>Figura 40.</i> Grafica de saturación del núcleo del transformador de 150kVA.	76
<i>Figura 42.</i> Simulación de carga del sistema.	77
<i>Figura 43.</i> Grafica de corriente Inrush con carga en vacío.	78

<i>Figura 44.</i> Ampliación del pico de corriente Inrush.....	78
<i>Figura 45.</i> Ampliación a corriente de estabilización (carga en vacío).	80
<i>Figura 46.</i> Armónicos de la corriente Inrush con carga en vacío fase 1.....	80
<i>Figura 46.</i> Armónicos de la corriente Inrush con carga en vacío fase 2.....	81
<i>Figura 46.</i> Armónicos de la corriente Inrush con carga en vacío fase 3.....	81
<i>Figura 47.</i> Grafica de corriente Inrush con carga al 100%.....	82
<i>Figura 48.</i> Ampliación a corriente de estabilización (carga al 100%).	83
<i>Figura 49.</i> Armónicos de la corriente Inrush con carga al 100% fase 1.....	83
<i>Figura 49.</i> Armónicos de la corriente Inrush con carga al 100% fase 2.....	84
<i>Figura 49.</i> Armónicos de la corriente Inrush con carga al 100% fase 3.....	84
<i>Figura 50.</i> Tiempo de cierre para el switch (S1, S2 y S3).....	85
<i>Figura 51.</i> Grafica de corriente Inrush con carga en vacío y tiempo de accionamiento de S1, S2 y S3.	86
<i>Figura 52.</i> Armónicos de la corriente Inrush con carga en vacío y tiempo de accionamiento de S1 fase 1.	87
<i>Figura 52.</i> Armónicos de la corriente Inrush con carga en vacío y tiempo de accionamiento de S1 fase 2.	87
<i>Figura 52.</i> Armónicos de la corriente Inrush con carga en vacío y tiempo de accionamiento de S1 fase 3.	88
<i>Figura 53.</i> Grafica de corriente Inrush con carga al 100% y tiempo de accionamiento de S1, S2 y S3.	89
<i>Figura 54.</i> Armónicos de la corriente Inrush con carga al 100% y tiempo de accionamiento de S1 fase 1.	90

Figura 54. Armónicos de la corriente Inrush con carga al 100% y tiempo de accionamiento de S2
fase 2. 90

Figura 54. Armónicos de la corriente Inrush con carga al 100% y tiempo de accionamiento de S1
fase 1. 91

Lista de tablas

Tabla 1. <i>Datos del transformador 37.5kVA</i>	45
Tabla 2. <i>Datos de modelado del transformador de 37.5kVA</i>	50
Tabla 3. <i>Datos de magnetización del transformador de 37.5kVA</i>	51
Tabla 4. <i>Datos del transformador 150kVA</i>	65
Tabla 6. <i>Datos de magnetización del transformador de 150kVA</i>	70

Resumen

ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DE LAS CORRIENTES INRUSH EN LOS TRANSFORMADORES DE DISTRIBUCIÓN A PARTIR DE SU COMPORTAMIENTO TRANSITORIO EMPLEANDO SOFTWARE DE SIMULACIÓN ESPECIALIZADO.

CRISTIAN E. GONZÁLEZ

JOSÉ C. MORENO

El presente trabajo se enfoca en el análisis del comportamiento de las corrientes Inrush en transformadores de distribución, un problema crítico para los operadores de red en Colombia.

Estas corrientes, junto con las condiciones atmosféricas adversas, son una de las principales causas de falla en estos equipos, afectando la calidad del servicio eléctrico.

El estudio se centró en comprender el fenómeno de la corriente Inrush en su estado transitorio, empleando software de simulación especializado ATP/EMTP. Se planteó la modelación de transformadores monofásicos y trifásicos, así como la simulación de circuitos reales de distribución de la Institución Universitaria Pascual Bravo. Esto permitirá determinar el momento adecuado de energización del transformador para reducir el impacto sobre la red y el equipo.

El trabajo busca evidenciar la relevancia del análisis del comportamiento de las corrientes Inrush en transformadores de distribución a partir de su efecto transitorio, contribuyendo así a la mejora de la confiabilidad y eficiencia del sistema eléctrico.

Palabras claves: Voltaje, corrientes inrush, transformadores, ATP Draw

Abstract

ANALYSIS OF THE BEHAVIOR OF INRUSH CURRENTS IN DISTRIBUTION TRANSFORMERS FROM THEIR TRANSIENT BEHAVIOR USING SPECIALIZED SIMULATION SOFTWARE.

CRISTIAN E. GONZÁLEZ

JOSÉ C. MORENO

This paper focuses on the analysis of the behavior of inrush currents in distribution transformers, a critical problem for network operators in Colombia.

These currents, together with adverse atmospheric conditions, are one of the main causes of failure in this equipment, affecting the quality of electric service.

The study focused on understanding the Inrush current phenomenon in its transient state, using specialized simulation software ATP/EMTP. The modeling of single-phase and three-phase transformers was proposed, as well as the simulation of real distribution circuits of the Institución Universitaria Pascual Bravo. This will allow determining the appropriate moment of transformer energization to reduce the impact on the network and the equipment.

The work seeks to demonstrate the relevance of the analysis of the behavior of Inrush currents in distribution transformers based on their transient effect, thus contributing to the improvement of the reliability and efficiency of the electric system.

Keywords: Voltage, inrush currents, transformers, ATP Draw.

Glosario

Corriente Inrush: Es un "pico" de electricidad que fluye cuando encendemos un aparato eléctrico, como un transformador. Es momentánea y puede ser más fuerte que la corriente normal.

Calidad del Servicio Eléctrico: Significa que la electricidad que llega a nuestras casas es estable y confiable. Si hay problemas como cortes de luz, la calidad del servicio no es buena.

Condiciones Atmosféricas Adversas: Son situaciones difíciles relacionadas con el clima. Por ejemplo, una tormenta fuerte o un rayo que pueden afectar la electricidad.

Dispositivos de Protección contra la Corriente Inrush: Son "guardianes" que ayudan a controlar y limitar la corriente Inrush cuando se enciende un transformador. Evitan que sea demasiado fuerte.

Estado Transitorio: Es una especie de "momento de ajuste" cuando se enciende un dispositivo eléctrico, durante este período, pueden ocurrir cosas como la corriente Inrush.

Falla en Transformadores: Esto sucede cuando algo va mal en el funcionamiento del transformador. Puede ser por diferentes razones, como la corriente Inrush o problemas causados por el clima.

Modelar: Es hacer una maqueta en la computadora. En este caso, se trata de crear una representación virtual de un transformador o un circuito eléctrico.

Software de Simulación Especializado (ATP/EMTP): Es un programa de computadora que nos ayuda a entender cómo se comportan los sistemas eléctricos. Nos permite simular situaciones y ver cómo reaccionan.

Saturación Transitoria: Es cuando el núcleo del transformador se llena temporalmente de electricidad. Esto puede ser dañino si no se controla adecuadamente.

Transformadores: Son dispositivos mecánicos que varían valores de tensión.

Técnicas de Conexión Adecuadas: Son maneras "inteligentes" de conectar un transformador para evitar problemas como la corriente Inrush excesiva.

Transformadores de Distribución: Son "cambios de voltaje". Se usan para que la electricidad pueda llegar a nuestras casas a un nivel seguro. A veces cuando se encienden pueden tener esa corriente Inrush.

Voltaje: Es la fuerza de la electricidad, como la "presión" que hace que la corriente fluya. Se mide en voltios.

Introducción

La electricidad se puede considerar como una necesidad básica para la humanidad, toda vez que esta propicia desde una simple iluminación hasta el funcionamiento de diversas y complejas máquinas y equipos; es aquí donde la ingeniería eléctrica como aquella que se encarga del estudio, diseño, desarrollo y mantenimiento de sistemas y dispositivos que utilizan electricidad cobra relevancia y una alta demanda en el mercado laboral.

En el marco de los estudios realizados en esta ingeniería, en la Institución Universitaria Pascual Bravo es imperante que los estudiantes cuenten con todas las competencias necesarias que les permitan prestar un servicio de calidad. En este orden de ideas, para avanzar no solo en conocimientos teóricos, sino también en la práctica; en el marco del trabajo de grado se analiza el comportamiento de las corrientes Inrush en transformadores de distribución.

Inicialmente se modelaron dos escenarios de pruebas, el primero corresponde al modelo de transformador monofásico y en el segundo caso un transformador trifásico, en ambos se estudió el comportamiento transitorio empleando software de simulación ATP/ EMTP.

Dentro de los hallazgos, se evidencia que las principales fallas en ambos transformadores obedecen a que las corrientes inrush son de corta duración y presentan altos picos (subidas eléctricas) que ocurren al energizar el equipo eléctrico.

1. Planteamiento de Problema

1.1. Descripción

Los transformadores de distribución de energía eléctrica son instalados en las redes para que cumplan un papel importante en las diferentes etapas de la cadena productiva de la energía eléctrica, cómo son: generación, transmisión y distribución. Para esta última fase el transformador es utilizado para reducir los voltajes a niveles permisibles para suministrar el servicio de energía eléctrica a los hogares y usuarios finales, permitiendo el funcionamiento de los equipos a niveles adecuados de tensión.

El fenómeno de la corriente de Inrush es probablemente el proceso transitorio más común en la utilización de los transformadores de distribución, debido a la habitual realización de maniobras de conexión y desconexión que se llevan a cabo en la operación y mantenimiento en las redes de distribución. Los valores elevados de corriente Inrush, pueden causar una serie de efectos nocivos tanto para el sistema eléctrico que lo alimenta como para el propio transformador, tales como caídas momentáneas de tensión, sobretensiones armónicas temporales, estrés electromecánico en los devanados y deterioro del aislamiento (Escobar, 2017).

La corriente Inrush en transformadores de distribución hace referencia a la corriente transitoria que fluye a través del transformador cuando se conecta a la red eléctrica. Esta corriente puede ser varias veces mayor que la corriente nominal del transformador y puede durar unos pocos ciclos.

La corriente Inrush se produce debido a la saturación transitoria del núcleo del transformador y puede causar daños a los equipos conectados a este, así como afectar la calidad de la energía eléctrica suministrada a la red; por lo tanto, es importante analizar la forma de reducir la corriente Inrush y la aplicación de técnicas de conexión adecuadas.

Con la realización de este trabajo se pretende estudiar el comportamiento de la corriente Inrush en dos transformadores (uno trifásico y otro monofásico), utilizados en la Institución Universitaria Pascual Bravo. Para lo anterior, se consideraron las características reales de los circuitos eléctricos en los que se encuentran conectados los transformadores y los valores de sus parámetros nominales.

1.2. Formulación

Para el desarrollo del presente trabajo se usó como eje central la siguiente pregunta problematizadora:

¿Es posible evidenciar el comportamiento transitorio de las corrientes de energización Inrush en dos transformadores de la Institución Universitaria Pascual Bravo empleando el software de simulación ATP Draw ATP/EMTP con la consideración de los parámetros nominales de los equipos que componen la red?

2. Justificación

Las corrientes de energización Inrush son un fenómeno transitorio de gran importancia en la operación de transformadores eléctricos. Estas corrientes, que resultan de la magnetización inicial del núcleo del transformador al aplicarle una tensión, pueden ser varias veces superiores a las corrientes nominales. Su comprensión es crucial debido a su capacidad para desencadenar efectos perjudiciales en la red eléctrica, tales como sobretensiones, sobrecorrientes y disparos de dispositivos de protección.

Este tipo de corrientes pueden provocar perturbaciones significativas en la red eléctrica durante el proceso de energización del transformador. dichas perturbaciones pueden tener consecuencias graves, como la desconexión no deseada de equipos, interrupciones en el suministro eléctrico y, en el peor de los casos, daños en equipos sensibles; por lo tanto, comprender y prevenir estos efectos es esencial para garantizar la estabilidad y seguridad del sistema eléctrico de la Institución Universitaria Pascual Bravo.

Las corrientes Inrush pueden someter al transformador y otros equipos de la red a niveles elevados de corriente y estrés térmico durante breves períodos de tiempo. Esto puede acortar significativamente la vida útil de los equipos y aumentar el riesgo de fallas prematuras; por lo tanto, evaluar y mitigar estas corrientes es fundamental para proteger la integridad de los activos de la red eléctrica y minimizar los costos asociados con el mantenimiento y reemplazo de equipos.

La simulación del comportamiento de las corrientes Inrush utilizando herramientas como ATP Draw ATP/EMTP ofrece la oportunidad de identificar y abordar posibles puntos débiles en el diseño y la operación de la red eléctrica, esto incluye la optimización de la coordinación de protecciones, la selección adecuada de equipos y la implementación de estrategias de mitigación de riesgos. Además de mejorar la eficiencia operativa y energética, se pueden reducir los costos operativos y promover un uso más sostenible de los recursos.

Al considerar los parámetros nominales de los equipos en la simulación, se garantiza la precisión y fiabilidad de los resultados obtenidos, permitiendo una mejor comprensión del comportamiento real de la red eléctrica y facilitando la toma de decisiones fundamentadas en cuanto a diseño, operación y mantenimiento.

La investigación y evaluación del comportamiento de las corrientes de energización Inrush en transformadores utilizando software de simulación y datos nominales de equipos es esencial para garantizar la seguridad, estabilidad y eficiencia operativa óptima de la red eléctrica de la Institución Universitaria Pascual Bravo.

3. Objetivos

3.1. Objetivo General

Analizar el comportamiento de las corrientes Inrush en dos transformadores de distribución pertenecientes a la red eléctrica de la Institución Universitaria Pascual Bravo a partir de su comportamiento transitorio empleando software de simulación especializado.

3.2. Objetivos Específicos

Modelar un transformador monofásico de la red de la Institución Universitaria Pascual Bravo para el estudio de su comportamiento transitorio empleando software de simulación ATP/ EMTP.

Modelar un transformador trifásico de la red de la Institución Universitaria Pascual Bravo para el estudio de su comportamiento transitorio empleando software de simulación ATP/ EMTP.

Analizar los resultados obtenidos, a partir de la simulación de los transformadores monofásicos y trifásicos en el software ATP/ EMTP.

4. Marco teórico

4.1. Transformadores Eléctricos

Se denomina transformador o trafo (abreviatura), a un dispositivo eléctrico que permite aumentar o disminuir la tensión en un circuito eléctrico de corriente alterna, manteniendo la frecuencia. La potencia que ingresa al equipo, en el caso de un transformador ideal (esto es, sin pérdidas), es igual a la que se obtiene a la salida. Las máquinas reales presentan un pequeño porcentaje de pérdidas, dependiendo de su diseño, tamaño, etc (Pérez Londoño & López Quintero, 2018).

Este convierte la energía eléctrica alterna de un cierto nivel de tensión, en energía alterna de otro nivel de tensión, por medio de interacción electromagnética. Está constituido por dos o más bobinas de material conductor, aisladas entre sí eléctricamente y por lo general enrolladas alrededor de un mismo núcleo de material ferromagnético. La única conexión entre las bobinas la constituye el flujo magnético común que se establece en el núcleo.

Están basados en el fenómeno de la inducción electromagnética y están constituidos, en su forma más simple, fabricado bien sea de hierro dulce o de láminas apiladas de acero eléctrico, aleación apropiada para optimizar el flujo magnético. Las bobinas o devanados se denominan primario y secundario según correspondan a la entrada o salida del sistema en cuestión, respectivamente. También existen transformadores con más devanados; en este caso, puede existir un devanado "terciario", de menor tensión que el secundario.

4.1.1. Principio de funcionamiento de un transformador. El principio de funcionamiento de un transformador se basa en la inducción electromagnética. Cuando una corriente alterna (CA) fluye a través de la bobina primaria, genera un campo magnético variable en el tiempo alrededor de ella. Este campo magnético en constante cambio induce un voltaje en la bobina secundaria. La relación entre el voltaje en la bobina primaria (V_p) y el voltaje inducido en la bobina secundaria (V_s) está determinada por la relación de las espiras (vueltas) de ambas bobinas (Pérez Londoño & López Quintero, 2018).

Matemáticamente, esto se expresa como:

$$\frac{V_p}{V_s} = \frac{N_p}{N_s} \quad (1)$$

Donde:

V_p : Voltaje en la bobina primaria.

V_s : Voltaje en la bobina secundaria.

N_p : Número de espiras en la bobina primaria.

N_s : Número de espiras en la bobina secundaria.

Así, si la bobina secundaria tiene más espiras que la primaria, el voltaje en la secundaria será mayor que en la primaria, y viceversa. De esta manera, un transformador puede elevar o reducir voltajes dependiendo de la relación de espiras.

El transformador, además, ofrece la ventaja de poder aislar eléctricamente el circuito primario del secundario, ya que no hay una conexión directa entre las bobinas. Esto puede ser útil en aplicaciones donde se requiere una separación entre partes del circuito por razones de seguridad o de funcionalidad.

4.1.2. Energización de Transformador. Cuando un transformador se energiza por primera vez (sin considerar flujos remanentes) se presenta una corriente de magnetización (también conocida como corriente de energización o Inrush), la cual es un fenómeno transitorio y depende de características del material del núcleo del transformador y es proporcional a la intensidad campo magnético (H) requerido para reorientar los dominios magnéticos del material (generar densidad de campo magnético (B)).

La densidad de campo magnético (B) se puede expresar como:

$$\beta = \mu * H \quad (2)$$

Donde:

B : Densidad de flujo magnético y está dada en Weber/m² o Tesla ([Wb/m²] o [T])

μ : Permeabilidad magnética del material y representa el esfuerzo, por unidad de longitud, que debe ejercer la corriente para establecer un campo magnético en un determinado material. Su unidad es Henrio/metro [H/m].

H: intensidad del campo magnético y representa el esfuerzo de la corriente para establecer un campo magnético, su unidad es Amperios * vuelta/metro [A*vuelta/m]

4.1.3. Tipos de Transformadores. Existen diversos tipos de transformadores que presentan especificaciones puntuales para satisfacer necesidades específicas, algunos de interés para la presente investigación son los siguientes:

Transformadores de potencia: Los transformadores de potencia son dispositivos eléctricos diseñados para modificar la tensión de corriente alterna en sistemas de energía eléctrica. Estos equipos permiten elevar o reducir la tensión de manera eficiente, facilitando la transmisión y distribución de energía eléctrica en diferentes voltajes, lo que contribuye a la eficacia y seguridad de las redes eléctricas (Maldonado & Vera Gavilanez, 2017).

Los transformadores de potencia son fundamentales en la infraestructura eléctrica para satisfacer las necesidades de voltaje de diversas aplicaciones industriales y comerciales. Además, son esenciales para minimizar pérdidas de energía y mantener la eficiencia en la distribución eléctrica a lo largo de las redes de suministro. Los transformadores de potencia suelen ser equipos de gran tamaño y se encuentran en subestaciones eléctricas.

Desde un punto de vista energético se le puede definir como un conversor electromagnético de la energía, que transmite energía eléctrica con ciertos valores de tensión y corriente en uno de sus devanados denominado primario (por donde ingresa la energía), a valores diferentes de tensión y corriente, en los demás devanados que denominados secundarios. El comportamiento

transitorio de las variables del transformador dependerá entonces de los valores de los parámetros de este: Resistencias, autoinducciones e inductancias mutuas, pero además de los parámetros de la carga en el secundario.



Figura 1. Transformador de potencia.

Fuente: Extraído de <https://goo.su/6vzXWJ>

Nota: Transformador de potencia de 50.000kVA

Transformador Trifásico: Los transformadores trifásicos son máquinas eléctricas que permiten aumentar o disminuir la tensión en un circuito eléctrico trifásico, manteniendo una relación entre sus fases, la cual depende del tipo de conexión de este circuito. Est: formado por un conjunto de 3 devanados (bobinas) para el primario del transformador y otras 3 para el secundario o de salida del transformador. Entonces podríamos decir que está constituido por tres transformadores monofásicos (Álvarez Pulido, 2009).

Cualquier máquina que trabaja con energía eléctrica cuenta con un transformador que esté proveyendo la energía con el potencial justo, aunque con una función particular. Precisamente, estos elementos se emplean en el suministro o el transporte de energía a grandes distancias en sistemas de potencias eléctricas, considerándose un instrumento prácticamente universal aplicado por las siguientes razones:

Distribución de energía: Transporta la energía con alto potencial y baja intensidad de manera más eficiente porque eleva el potencial a alta tensión.

Protección de maquinaria eléctrica: Son muy usados para proteger los equipos eléctricos, controlando los pulsos de energía.

Genera altos voltajes: Se ocupa de poner en marcha grandes máquinas. Por ejemplo, en el ámbito ferroviario, se encargan de hacer mover las maquinarias que necesitan un alto voltaje para funcionar.



Figura 2. Transformador trifásico.
Fuente: Extraído de <https://goo.su/KykGn>

Transformador Monofásico: Es un dispositivo eléctrico diseñado para transferir corriente alterna o tensión de un circuito eléctrico a otro. Por inducción electromagnética. Puede diseñarse para subir o bajar las tensiones. Los transformadores monofásicos por lo general tienen una larga vida útil si trabajan en condiciones normales (Rodas Rendón, 2005).

Estos tienen un componente electrónico, que transmite energía eléctrica de un circuito a otro sin modificar su frecuencia. Un transformador monofásico es un componente esencial en muchos sistemas eléctricos y proporciona una fuente de energía confiable y segura.

Estos transformadores están diseñados para convertir la energía eléctrica de alto voltaje y baja corriente que generan las centrales eléctricas en energía de bajo voltaje y alta corriente que se utiliza en los hogares y las empresas. Los transformadores eléctricos monofásicos tienen una

gran ventaja que es facilidad de instalación, los transformadores monofásicos son relativamente fáciles de instalar y se pueden instalar en una variedad de lugares, incluidos hogares residenciales, edificios comerciales e instalaciones industriales.



Figura 3. Transformador monofásico.
Fuente: Extraído de <https://onx.la/b2595>

4.2. Corriente Inrush.

La corriente Inrush se denomina a la corriente que toma de la red el transformador durante los primeros ciclos desde el momento en que es energizado. Se trata de un fenómeno transitorio de unos pocos ciclos de red que por la naturaleza no lineal del núcleo magnético lleva a la máquina a la saturación (Oliveira, y otros, 2012).

La corriente de inrush puede definirse como una corriente transitoria de excitación, que se manifiesta como una corriente de carácter pulsante cuyo valor máximo, generalmente supera varias veces la magnitud de la corriente nominal de la máquina. Puede caracterizarse como la suma de dos componentes; una componente sinusoidal de estado estable y una componente transitoria y aperiódica de corriente directa que se atenúa en el tiempo a través de la inductancia y la resistencia del devanado energizado.

Estas corrientes, a su vez, inducen flujos de estado estable (Φ) y transitorio. Como el flujo estable varía con el tiempo, en algún momento, se adiciona al flujo transitorio produciendo la saturación del núcleo magnético y si se tiene en cuenta, además, el flujo residual (Φ_r), puede darse el caso de un nivel de inducción magnética mayor a dos veces la inducción magnética de trabajo o estable del transformador (Hernández Areu, Ramos Guardarrama, & Perera Escobar, 2017).

El establecimiento de este flujo máximo hace llegar al núcleo a la saturación por tanto establece altos niveles de fuerza magnética, la cual es proporcional a la tensión aplicada,

generando corrientes de magnitudes de hasta 8 y 10 veces el valor nominal. La situación empeora cuando el transformador ya había sido energizado y se hace un cierre, pues el flujo residual que tenía hace aumentar mucho más el valor del flujo máximo, por tanto, la corriente Inrush del nuevo cierre llega inclusive a valores de 40 veces la corriente nominal dependiendo del diseño del transformador (Hernández Areu, Ramos Guardarrama, & Perera Escobar, 2017).

4.2.1. Esfuerzos electromecánicos en transformadores causados por la corriente de Inrush.

Los valores pico de las corrientes de Inrush máximas, se asemejan a los valores que pudieran esperarse para corrientes transitorias de cortocircuito. Sin embargo, las características de las tensiones mecánicas a causa del estrés electromecánico en estos dos tipos de corrientes son diferentes. Mientras que la corriente de cortocircuito transitoria origina fuerzas que envuelven a cada uno los devanados del transformador que alimenta el cortocircuito, la corriente de Inrush involucra solamente al devanado que está siendo energizado (Hernández Areu, Ramos Guardarrama, & Perera Escobar, 2017).

La duración del transitorio asociado a la corriente de Inrush es considerablemente mayor que el de la corriente de cortocircuito. Otro dato a tener en cuenta es que la presencia de corrientes de Inrush es mucho más frecuente, ya que los eventos responsables de este fenómeno forman parte de la operación habitual de cualquier sistema (Hernández Areu, Ramos Guardarrama, & Perera Escobar, 2017).

4.2.2. Factores que afectan a la corriente Inrush. Dentro de los parámetros del propio transformador el factor más influyente en la magnitud de la corriente de Inrush es el número de

espiras del devanado, seguido de la inducción magnética y las características geométricas del molde de las bobinas.

Las características geométricas del núcleo del transformador: ancho de la columna, ancho y altura de la ventana, no juegan un papel significativo en la magnitud de la corriente Inrush (Hernández Areu, Ramos Guardarrama, & Perera Escobar, 2017). Además, hay varios factores externos al transformador que afectan el fenómeno de la corriente de Inrush, estos son:

Instante en que se conecta el transformador: La corriente de Inrush decrece a medida que aumenta el ángulo de la onda de tensión y es máxima para $\alpha = 0^\circ$ y mínimo cuando $\alpha = 90^\circ$

El magnetismo residual que quedó en el transformador cuando se desconectó: La corriente de Inrush es agravada significativamente por la densidad de flujo residual, la cual depende de las características del material de núcleo y el factor de potencia de la carga del transformador en el instante en que se apagó. El instante de la desconexión tiene un efecto sobre la densidad de flujo residual dependiendo del tipo de carga (Hernández Areu, Ramos Guardarrama, & Perera Escobar, 2017).

4.3. Generación de la corriente Inrush

El análisis de la corriente de Inrush está fundamentado en la ley de Faraday como se muestra a continuación:

Cada vez que un flujo pasa por una vuelta del devanado, se induce voltaje.

$$v(t) = N \frac{d}{dt} \Phi(t) \quad (3)$$

Despejamos Φ de la ecuación (3) y obtenemos:

$$\Phi(t) = \frac{1}{N} \int_0^t V_s(t) dt \quad (4)$$

$$v_s(t) = V_m \sin(\omega t + \varphi) \quad (5)$$

En donde:

V_s : Voltaje del sistema

V_m : Magnitud del voltaje

Φ : Ángulo de switcheo.

Se sustituye la ecuación (4) en (5) y se obtiene.

$$\Phi(t) = \frac{1}{N} \int_0^t V_m \sin(\omega t + \varphi) dt \quad (6)$$

Resolviendo la integral obtenemos que el flujo

$$\Phi(t) = \frac{V_m}{N\omega} [\cos \cos(\varphi) - \cos \cos(\omega t + \varphi)] + \Phi(0) \quad (7)$$

En donde:

$\Phi(0)$ es la condición inicial ecuación.

$$\Phi_m = \frac{V_m}{N\omega} \quad (8)$$

En donde:

Φ_m : es la magnitud del flujo.

$$\Phi(0) = \Phi_m \cos \cos(\varphi) + \Phi_r \quad (9)$$

Φ_m es el flujo remanente. Si $\varphi \geq 0$ y $\Phi_r \geq 0$, se toma en cuenta solamente la corriente positiva. Pero cuando $\pi = \omega t + a$, $\Phi(t)$ obtiene su valor máximo el flujo, dará un flujo magnético al doble de su valor de estado estable.

$$\Phi_{max} = \Phi_m + \Phi_m \cos \cos(\alpha) + \Phi_r \quad (10)$$

O bien la peor condición que puede presenciar de flujo magnético, cuando se hace un cierre en un cruce por cero y además que exista un flujo residual, como resultado el flujo obtiene su valor máximo.

$$\Phi_{max} = 2 \frac{V_m}{N_w} + \Phi_r = 2\Phi_m + \Phi_r \quad (11)$$

Este flujo puede dar lugar a una gran corriente debido a la no-linealidad del núcleo ferromagnético y consecuentemente la aparición de la corriente de Inrush.

La Figura 4. muestra el comportamiento del flujo magnético, al hacer un cierre en cruce por cero y además existe un flujo residual, se observa que también existe una gran corriente.

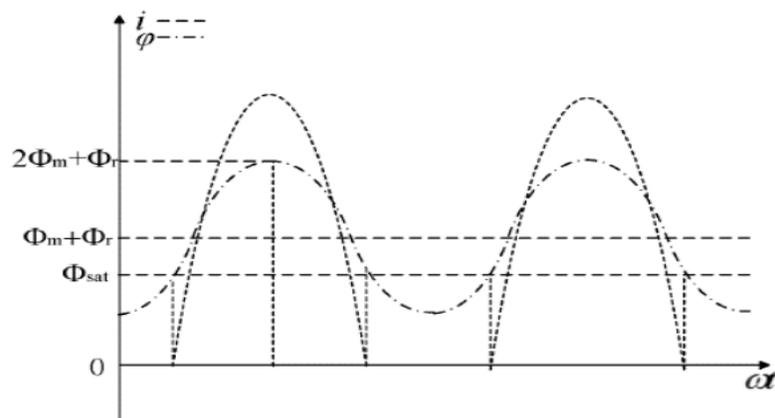


Figura 4. Flujo magnético.
Fuente: Extraído de <https://onx.la/58b22>

En donde Φ_{sat} es el punto de la saturación del núcleo, se puede decir que al energizar un transformador sin carga el núcleo del transformador opera en la región de saturación, donde la

corriente Inrush aumenta rápidamente. Pero cuando el núcleo no está operando en la región de saturación sino en la región lineal, no hay una corriente Inrush. El cambio periódico del flujo hace que el núcleo siga funcionando entre la región de saturación y la región lineal.

Al elevarse al doble el flujo magnético del núcleo de un transformador este genera que se sature, por lo tanto, la corriente de magnetización se eleva generando la corriente Inrush como se muestra en la Figura 5.

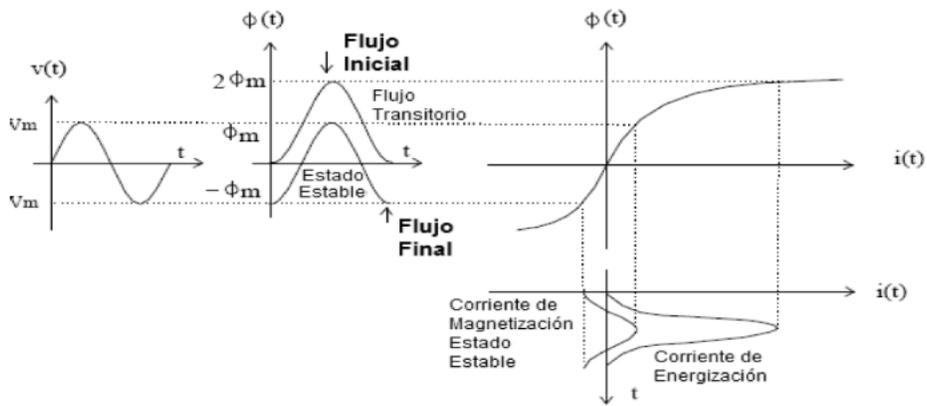


Figura 5. Curva de magnetización y la generación de la corriente Inrush.
 Fuente: Extraído de <https://onx.la/58b22>

4.4. Generación de la corriente Sympathetic Inrush

Como ya se ha mencionado que cuando un transformador se energiza sin carga en el sistema eléctrico, los transformadores en paralelo ya energizados se le generan una corriente similar a la corriente Inrush, que es la llamada corriente Sympathetic Inrush. En la Figura 6 se muestra el caso en el cual se presenta una corriente Sympathetic Inrush, L_1 y r_1 es la inductancia y

resistencia de T1 y L_2 y r_2 es la inductancia y resistencia de T2 y L_s es la combinación de inductancia de la fuente y la inductancia del transformador y r_s del sistema equivalente de CA.

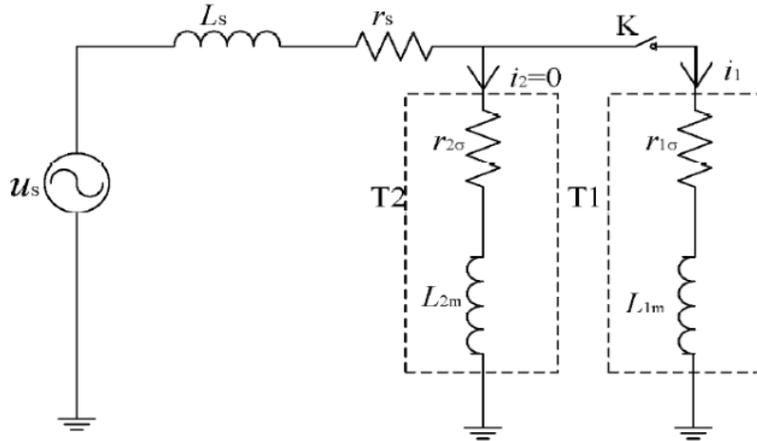


Figura 6. Circuito simple de dos transformadores en paralelo.
Fuente: Extraído de <https://onx.la/58b22>

Esta corriente (Sympathetic Inrush), también puede ser calculada con un procedimiento similar al de la corriente de Inrush:

La ecuación del flujo para el transformador T1, en la Figura 6 es:

$$\frac{d\Phi_1}{dt} = v_s - L_s \frac{di_1}{dt} - (r_2 + r_1)i_1 \quad (12)$$

En donde:

V_s : Voltaje de la fuente

I_s : Corriente del transformador T1.

La ecuación de flujo en T2 es:

$$\frac{d\Phi_2}{dt} = v_s - L_s \frac{di_1}{dt} - r_z i_1 \quad (13)$$

Si integramos las dos ecuaciones de flujo entre $0-2\pi$, obtenemos:

$$\Delta\Phi_1 = -2\pi(r_s + r_1)i_1 \quad (14)$$

$$\Delta\Phi_2 = -2\pi r_s i_1 = \frac{r_s}{r_s + r_1} \Delta\Phi_1 \quad (15)$$

Si asumimos que la corriente Inrush del transformador T1 se mantiene positiva causa que el transformador T2 genera una corriente de magnetización negativa, entonces el transformador dos opera en su región de saturación negativa debido a que es opuesta a la interacción del transformador T1, esto provoca que la impedancia del sistema tiende a disminuir y esto es un gran impacto en los sistemas de potencia (Vázquez Ojeda, 2020).

La resistencia de la línea entre la subestación y el transformador reduce la corriente y acelera su velocidad de decaimiento (Hernández Areu, Ramos Guardarrama, & Perera Escobar, 2017).

Cuando el transformador es conectado a una carga cuyo factor de potencia es bajo (ya sea inductivo o capacitivo), el pico de corriente es mayor (Hernández Areu, Ramos Guardarrama, & Perera Escobar, 2017).

5. Metodología

5.1. Tipo de proyecto

El presente estudio tiene como método la investigación aplicada, la cual, en palabras de Vargas Cordero, Z. R., (2009), esta es entendida como la utilización de los conocimientos en la práctica, para aplicarlos en provecho de los grupos que participan en esos procesos y en la sociedad en general, además del bagaje de nuevos conocimientos que enriquecen la disciplina. en concordancia con lo anterior su enfoque es de corte cuantitativo, cada vez que este tipo de investigación permite medir las variables o resultado a través de la utilización de técnicas estadísticas para el análisis de los datos recogidos.

5.2.Método

Para modelar los escenarios de simulación, es necesario conocer los valores pico de la corriente de Inrush en los primeros ciclos del transformador objeto de prueba para el presente proyecto, tomar la característica del fabricante, con lo anterior se someterá el transformador a las primeras pruebas y con los resultados hacer un análisis comparativo para determinar el mejor escenario que genere menor impacto en los transformadores.

Se presentarán diversos escenarios de pruebas en los cuales vamos a estimar el tiempo que demora en caer la corriente Inrush a un valor igual a la corriente de vacío normal, con lo anterior

identificamos cómo mitigar el impacto que tiene la magnetización en los momentos de la energización del equipo.

Modelar el transformador monofásico y trifásico para el estudio de su comportamiento transitorio empleando software de simulación ATP/ EMTP, se modelará en vacío y con carga para ambos escenarios se evaluarán el comportamiento y de acuerdo con los resultados enfatizamos en el escenario más beneficioso para el transformador.

Por todas las pruebas que se realizaron se tomaron registros de los resultados logrados en las diversas pruebas, se realizaron mediciones del comportamiento de la corriente Inrush para determinar las condición más desfavorable y beneficiosa para el equipo.

5.3. Instrumentos de recolección de información

La recolección de la información se realizará a través de la revisión documental y entrevista.

5.3.1. Revisión documental. Para referenciar esta investigación y profundizar en aprendizajes, conceptos y teorías relacionadas con corrientes inrush, manual de uso de software y fichas técnicas de los transformadores, se realiza transversalmente la revisión documental; lo que implica un proceso de revisión antes, durante y después de la recolección de la información.

6. Resultados del proyecto

El análisis del comportamiento de las corrientes Inrush en transformadores de distribución es fundamental para comprender y optimizar el funcionamiento de los sistemas eléctricos. En este proyecto, nos centramos en investigar este fenómeno mediante la simulación de dos transformadores de diferentes capacidades: uno de 37.5 kVA monofásico y otro de 150 kVA trifásico. A través de la recopilación de datos, la modelación y las simulaciones en software especializado, hemos obtenido resultados preliminares que arrojan luz sobre este aspecto crucial de la ingeniería eléctrica.

Inicialmente, recopilamos datos esenciales para la simulación, que incluyen parámetros eléctricos proporcionados por fórmulas y tablas de fabricantes, así como datos de placa de los transformadores. Estos datos nos permitieron configurar los modelos para la simulación y establecer condiciones realistas para el análisis.

6.1. Transformador monofásico de 37.5kVA saturable

Para este transformador debemos tener presente varios datos importantes que son necesarios para aplicarlo al software, como lo son: Los voltajes del primario y secundario, la resistencia de los devanados primario y secundario, la inductancia del primario y secundario, La corriente en vacío, la resistencia de pérdidas en el hierro, flujo magnético y la curva de magnetización,

En la figura 7 podemos apreciar el modelo constructivo del transformador. Donde:

I_p = Corriente del primario

I_s = Corriente del secundario

AT= Lado de alta del transformador

BT = Lado de baja del transformador

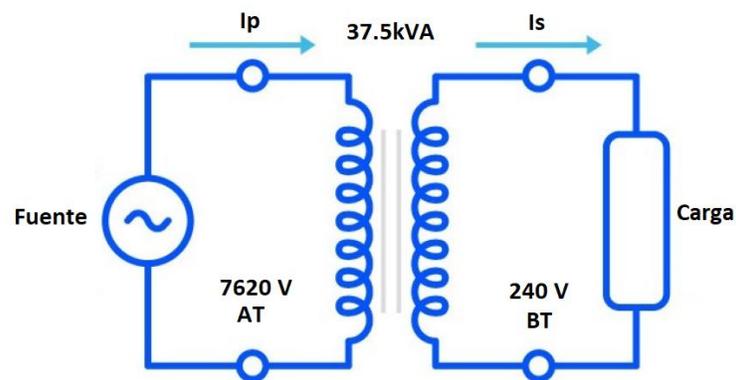


Figura 7. modelo constructivo del transformador monofásico de 37.5kVA

Fuente: Autores

Ya con esto presente podemos ver en la figura 8 los datos de placa que se necesitaran para el modelado en el software.

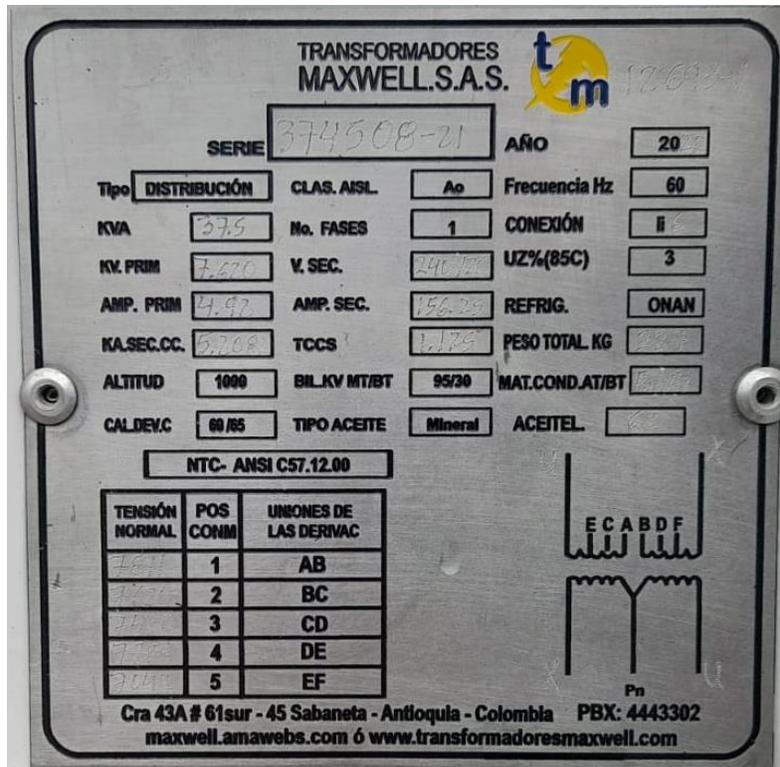


Figura 8. Datos de placa de transformador monofásico de 37.5kVA

Fuente: Autores

Debido a que no se cuenta con cierta información desde la placa del transformador esta se asume desde los datos del fabricante que se encuentran en el anexo A. Todos estos datos están planteados en la tabla 1.

Tabla 1.

Datos del transformador 37.5kVA

Datos de placa								
VA	V1AT (V)	V2BT (V)	Ip (A)	Is (A)	Zcc (%)	Io (%)	Pnu.BT (W)	f (Hz)
37500	7620	240	4,92	156,25	3	2	135	60

Fuente: Diseño propio

Nota: Los datos Zcc, Io y Pnu.BT Fueron tomados del anexo A

Ahora para hallar los datos necesarios para colocar en el software deberemos realizar algunas ecuaciones, por tal motivo y para tener una idea mas clara de donde salen los resultados en la figura 9 colocaremos el modelo de un transformador para bajas frecuencias.

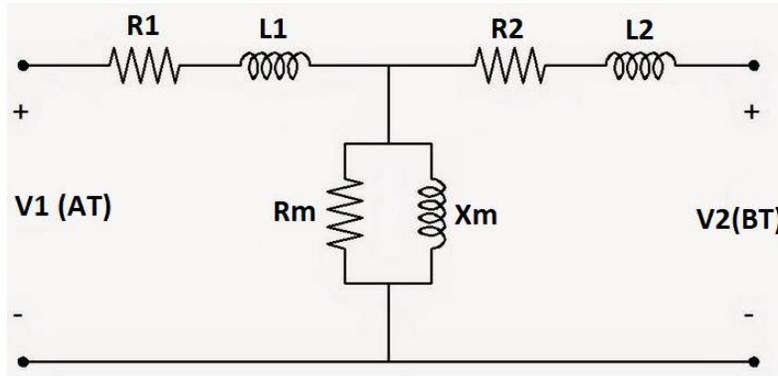


Figura 9. Modelo de transformador de baja frecuencia.

Fuente: Autores

Considerando que el transformador es saturable no se considera el valor de X_m . Por tanto, empieza con los cálculos para el lado de AT.

6.1.1. Cálculos en AT. Para esto se hará una serie de formulas descritas por las siguientes ecuaciones.

$$Z_{cc} = 3\% \approx \frac{X}{R} = 3 \quad (16)$$

$$Z_{baseAT} = \frac{V_{AT}^2}{S} \quad (17)$$

$$Z_{baseAT} = \frac{7620^2}{37500VA} = 1548.38\Omega \quad (17.1)$$

$$Z_{serieAT} = \left(\frac{Z_{cc}}{100}\right) * Z_{baseAT} \quad (18)$$

$$Z_{serieAT} = \left(\frac{3}{100}\right) * 1548.38\Omega = 46.45\Omega \quad (18.1)$$

$$X_{L1} = \frac{Z_{serieAT}}{2} \quad (19)$$

$$X_{L1} = \frac{46.45\Omega}{2} = 23.23\Omega \quad (19.1)$$

$$L_1 = \frac{X_{L1}}{(2\pi f)} \quad (20)$$

$$L_1 = \frac{23.23\Omega}{(2*3.1416*60)} \quad (20.1)$$

$$L_1 = \frac{23.23\Omega}{377} = 0.06161H \approx 61.61mH \quad (20.2)$$

$$R_1 = \frac{X_{L1}}{\left(\frac{X}{R}\right)} \quad (21)$$

$$R_1 = \frac{23.23\Omega}{3} = 7.74\Omega \quad (21.1)$$

6.1.2. **Cálculos en BT.** Para esto se hará una serie de fórmulas descritas por las ecuaciones.

$$Z_{baseBT} = \frac{V_{BT}^2}{S} \quad (22)$$

$$Z_{baseAT} = \frac{240^2}{37500VA} = 1.54\Omega \quad (22.1)$$

$$Z_{serieBT} = \left(\frac{Z_{cc}}{100}\right) * Z_{baseBT} \quad (23)$$

$$Z_{serieBT} = \left(\frac{3}{100}\right) * 1.54 = 0.05\Omega \quad (23.1)$$

$$X_{L2} = \frac{Z_{serieBT}}{2} \quad (24)$$

$$X_{L2} = \frac{0.05\Omega}{2} = 0.02\Omega \quad (24.1)$$

$$L_2 = \frac{X_{L2}}{(2\pi f)} \quad (25)$$

$$L_2 = \frac{0.02\Omega}{(2*3.1416*60)} \quad (25.1)$$

$$L_2 = \frac{0.02\Omega}{377} = 0.000061H \approx 0.061mH \quad (25.2)$$

$$R_2 = \frac{X_{L1}}{\left(\frac{X}{R}\right)} \quad (26)$$

$$R_2 = \frac{0.02\Omega}{3} = 0.00768\Omega \quad (26.1)$$

6.1.3. **Rama de magnetización.** Para esto se hará una serie de fórmulas descritas por las ecuaciones.

$$R_m = \frac{1}{G} \quad (27)$$

$$G_{BT} = \frac{P_{nu.BT}}{V_{BT}^2} \quad (28)$$

$$G_{BT} = \frac{135W}{240^2} = 0.002344\Omega \quad (28.1)$$

Se aplica la ecuación 27 mirándolo desde BT teniendo en cuenta los resultados de la ecuación 28.1.

$$R_{mBT} = \frac{1}{G_{BT}} \quad (29)$$

$$R_{mBT} = \frac{1}{0.002344\Omega} = 426.67\Omega \quad (29.1)$$

Se halla ahora para el lado de AT

$$R_{mAT} = R_{mBT} * \left(\frac{V_{AT}}{V_{BT}}\right)^2 \quad (30)$$

$$R_{mAT} = 426.67\Omega * \left(\frac{7620V}{240V}\right)^2 \quad (30.1)$$

$$R_{mAT} = 426.67\Omega * 1008.06 = 430106.67\Omega \quad (30.2)$$

Todos los resultados los podemos ver en la tabla 2.

Tabla 2.

Datos de modelado del transformador de 37.5kVA

Modelo del transformador							
V1 (AT)	R1 (Ω)	L1 (mH)	Rm (Ω)	Xm	R2 (Ω)	L2 (mH)	V2(BT)
7620	7,74	61,61	430106,67	Saturable	0,00768	0,061	240

Fuente: Diseño propio

Nota: Los resultados se toman de las ecuaciones antes resueltas.

6.1.4. Configuración del simulador. Con todos los datos del transformador listo, se hace el ensamble en el programa ATP-Draw como se muestra en la figura 10. En este caso se hará 3 simulaciones, Una de ellas es en vacío, con carga al 100% y otra realizando un cambio en los tiempos en el Suich (S1), donde se realizará un control de la corriente Inrush.

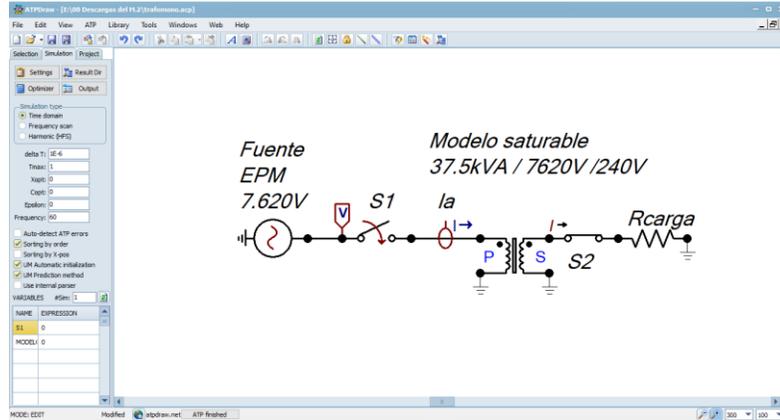


Figura 10. Modelado en programa de transformador monofásico de 37.5kVA.
Fuente: Autores

En las figuras 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18 y 19 se podrán verificar las configuraciones de cada uno de los componentes del circuito.

También es importante tener en cuenta los datos de magnetización del núcleo del transformador dadas en la tabla 3.

Tabla 3.
Datos de magnetización del transformador de 37.5kVA.

Construcción de la curva de saturación magnética del núcleo				
Valores tomados de internet		Valores para ATP-Draw		
VCA.BR(V)	ICA.BT(A)	VCA.AT(V)	ICA.AT(A)	ØAT (wb.esp)
60,040	0,116	1906,270	0,00366	7,151
120,080	0,189	3812,540	0,00596	14,302
180,120	0,252	5718,810	0,00795	21,453
210,140	0,335	6671,945	0,01056	25,029
240,160	0,681	7625,080	0,02143	28,604
255,170	1,440	8101,648	0,04535	30,392
277,690	10,038	8816,658	0,31617	33,074
300,200	78,671	9531,350	2,47782	35,755
315,210	318,102	10007,918	10,01896	37,543

Fuente: Diseño propio

Nota: Se aplicaron las ecuaciones 31, 32, 33 y 34 para llenar los valores para el software ATP-Draw.

Los datos se sacan gracias a las ecuaciones dadas a continuación.

$$\alpha = \frac{V_{AT}}{V_{BT}} \quad (31)$$

$$V_{CA.AT} = \alpha * V_{CA.BT} \quad (32)$$

$$I_{CA.AT} = \frac{V_{CA.BT}}{\alpha} \quad (33)$$

$$\phi_{AT} = \frac{V_{CA.AT}}{\pi f \sqrt{2}} \quad (34)$$

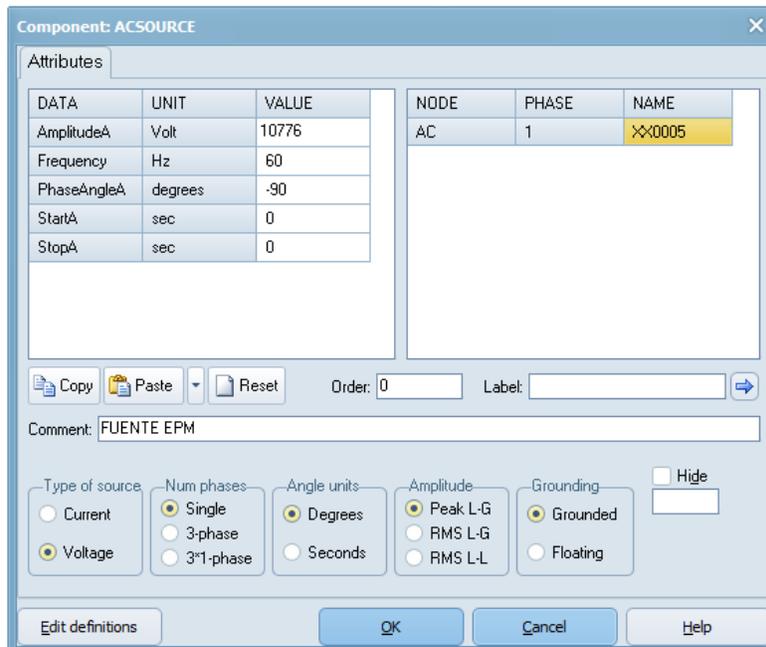


Figura 11. Fuente de EPM 7620V.

Fuente: Autores

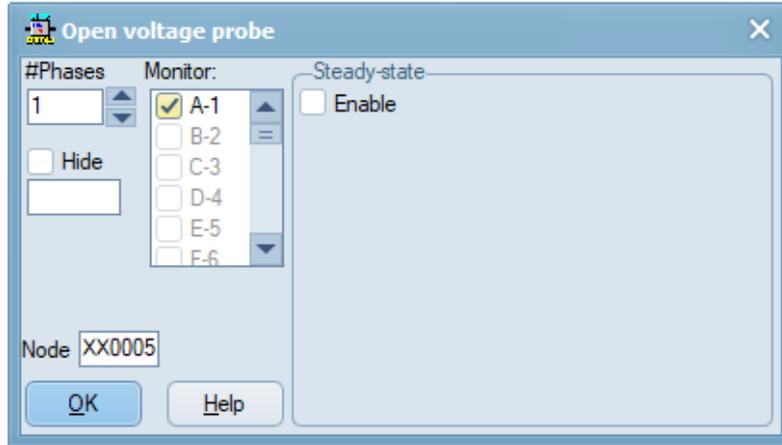


Figura 12. Probador de voltaje.

Fuente: Autores

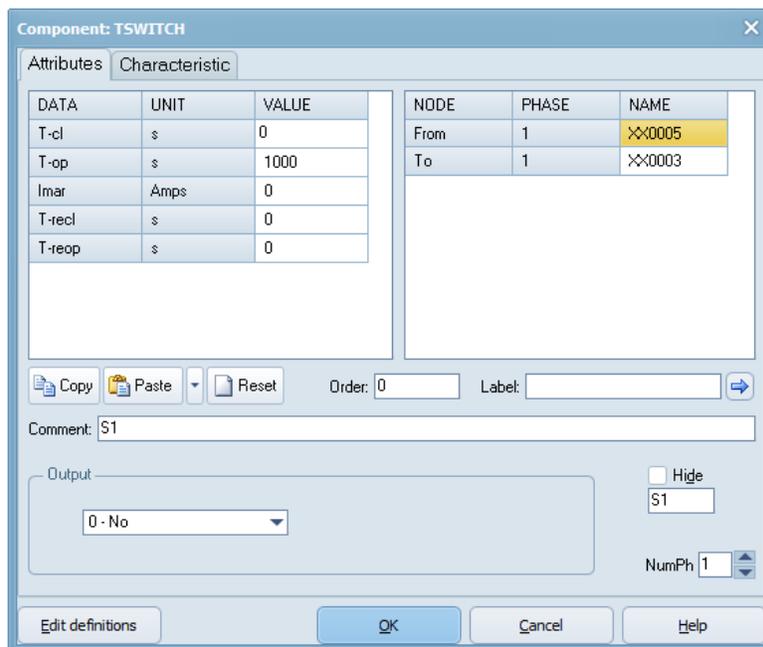


Figura 13. Switch (S1) para control de apertura y cierre de línea.

Fuente: Autores

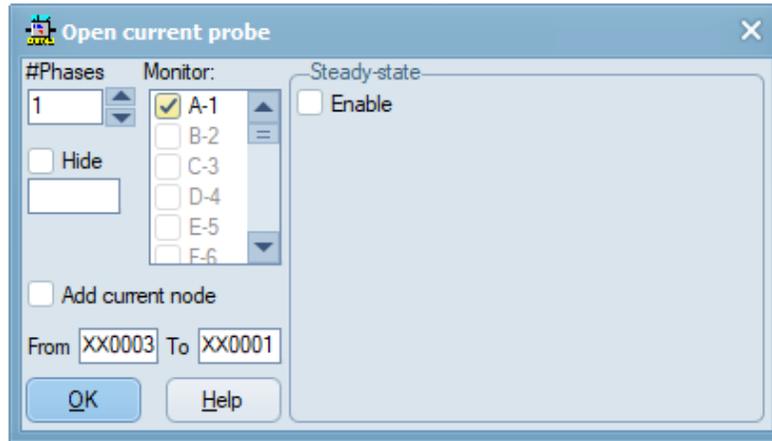


Figura 14. Probador de corriente.
Fuente: Autores

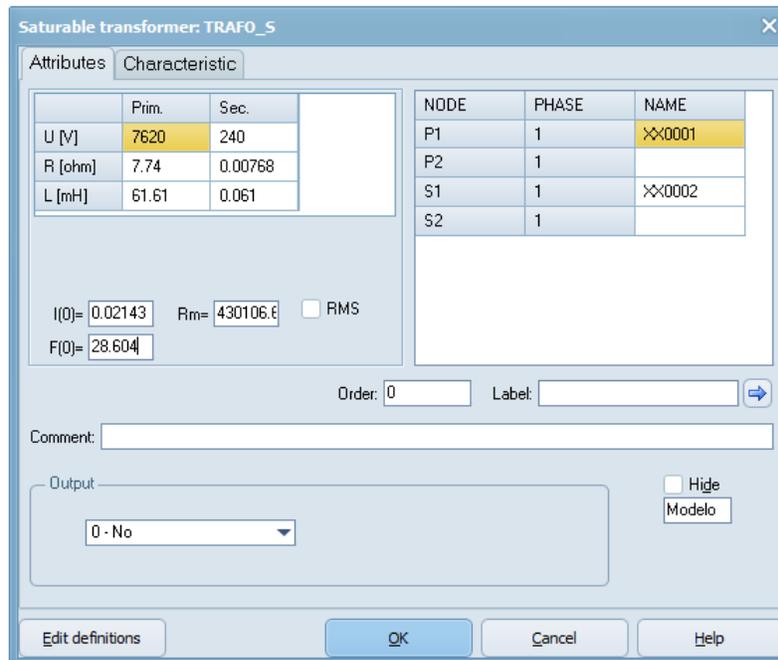


Figura 15. Datos del transformador.
Fuente: Autores

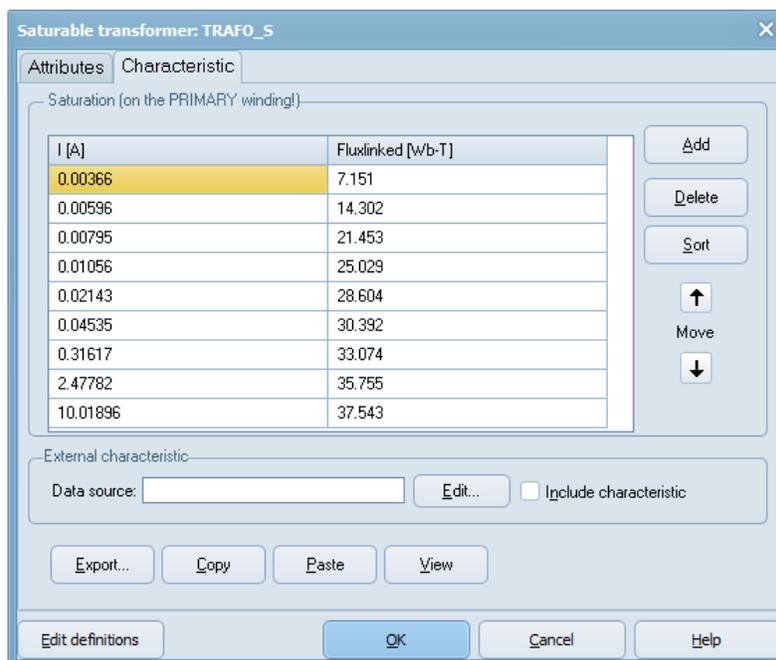


Figura 16. Datos de saturación visto desde el AT (datos tomados de la tabla 3).
Fuente: Autores

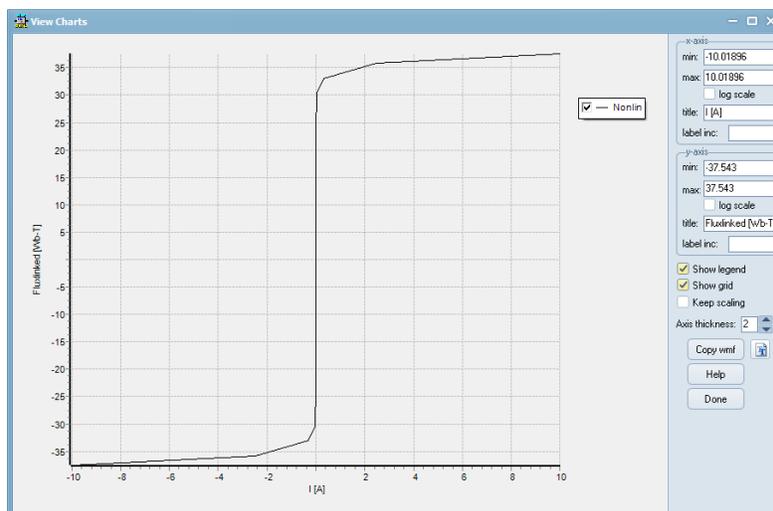


Figura 17. Grafica de saturación del núcleo del transformador de 37.5kVA.
Fuente: Autores.

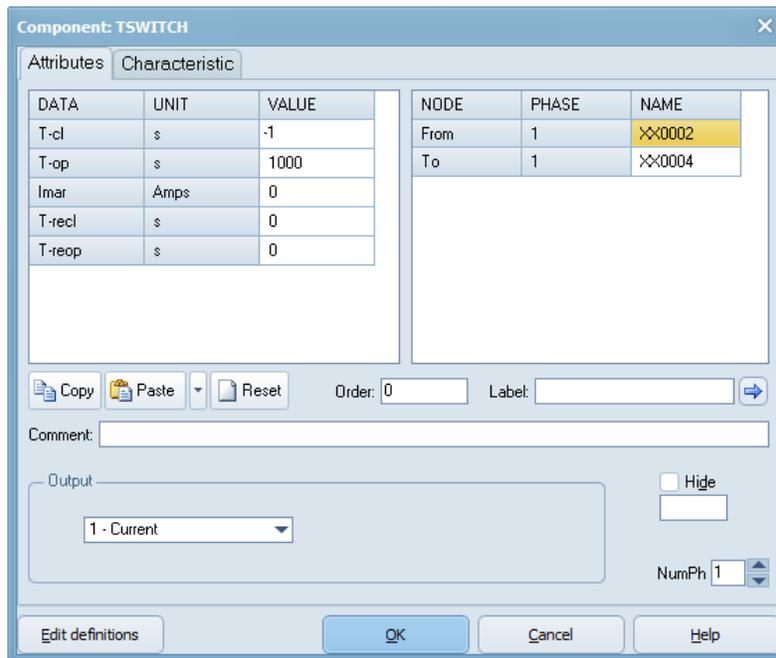


Figura 18. Switch (S2) para control de apertura y cierre de carga.
Fuente: Autores.

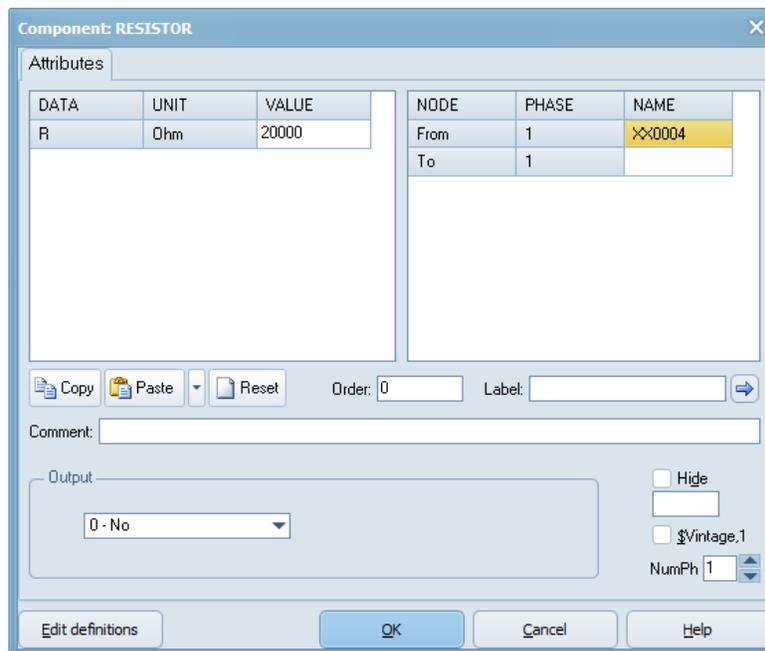


Figura 19. Simulación de carga del sistema.
Fuente: Autores
Nota: carga en vacío es de 20000 Ω y 100% de carga de 1.5 Ω

6.1.5. **Simulación del transformador.** Los datos obtenidos de la simulación se presentan con las figuras 20, 21, 22 y 23.

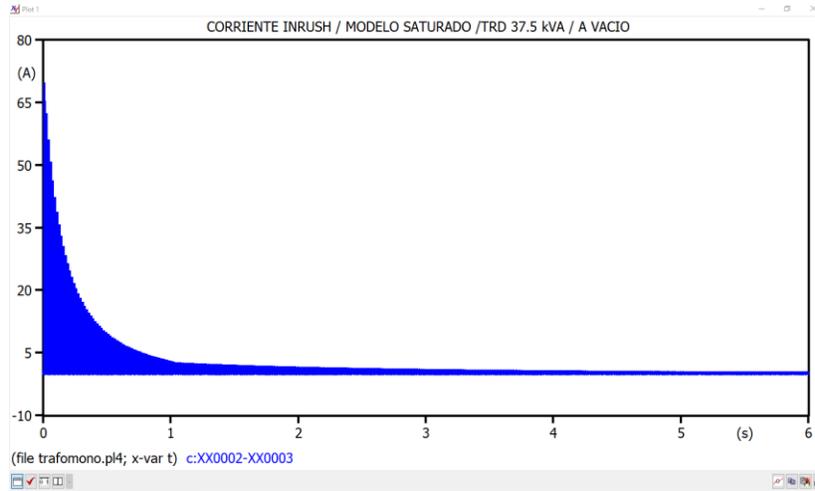


Figura 20. Grafica de corriente Inrush con carga en vacío.
Fuente: Autores

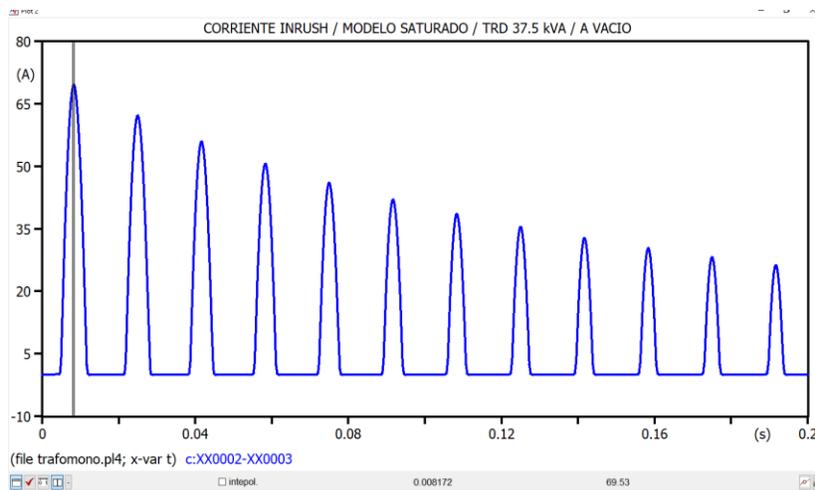


Figura 21. Ampliación del pico de corriente Inrush.
Fuente: Autores.

Con estos datos se puede determinar la cantidad de veces que sobrepasa la corriente nominal del AT y poder comparar con lo dicho en diferentes documentaciones referentes al tema, para lo

cual se establecen un corriente pico (I_{pico}) de 69.53A según gráfica y establecido dicho parámetro, se procede con las siguientes ecuaciones.

$$I_{RMS} = \frac{I_{pico}}{\sqrt{2}} \quad (35)$$

$$I_{RMS} = \frac{69.53A}{\sqrt{2}} = 49.17A \quad (35.1)$$

$$Sobre corriente = \frac{I_{RMS}}{I_p} \quad (36)$$

$$Sobre corriente = \frac{49.17A}{4.92A} = 9.994 \approx 10 veces \quad (36.1)$$

Lo cual nos indica que la sobre corriente en ese punto cuando S1 se cierra cuando la sinusoidal pasa por cero. Y la estabilización se muestra en la figura 22.

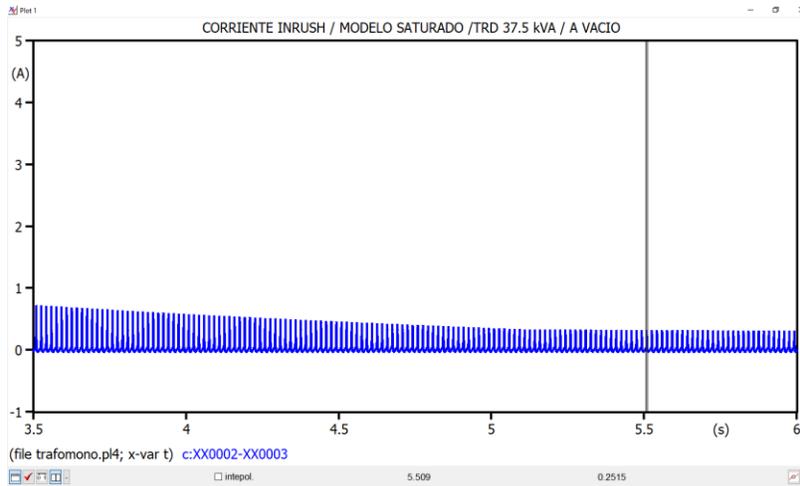


Figura 22. Ampliación a corriente de estabilización (carga en vacío).
Fuente: Autores.

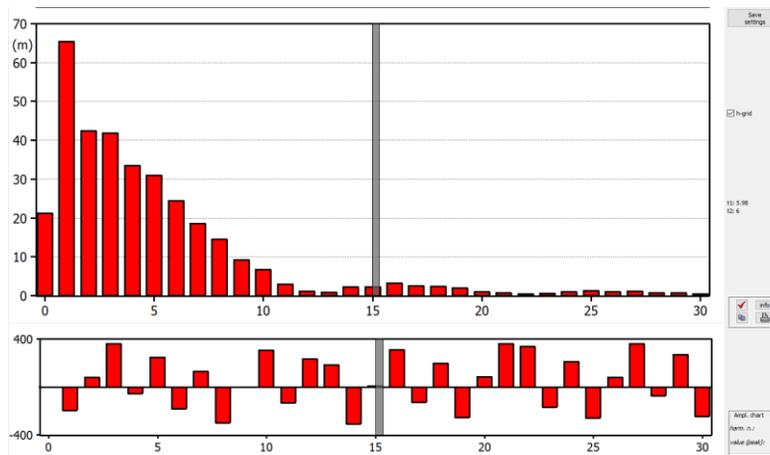


Figura 23. Armónicos de la corriente Inrush con carga en vacío.
Fuente: Autores.

Ahora la simulación se hará con la carga al 100%, esto lo podemos ver en las figuras

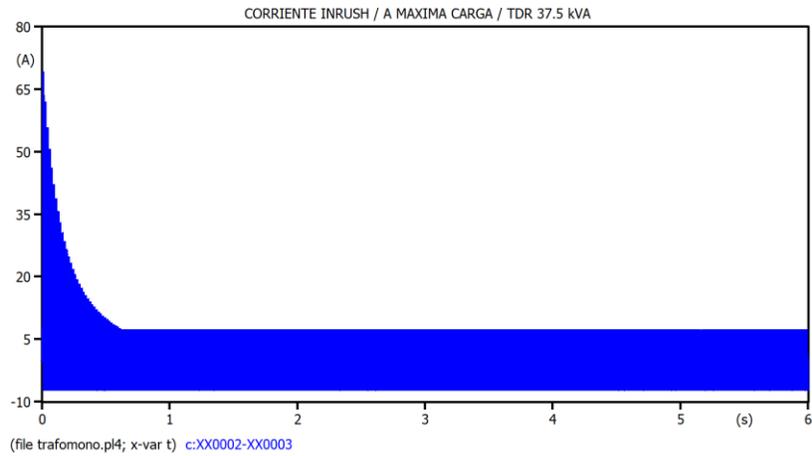


Figura 24. Grafica de corriente Inrush con carga al 100%.
Fuente: Autores.

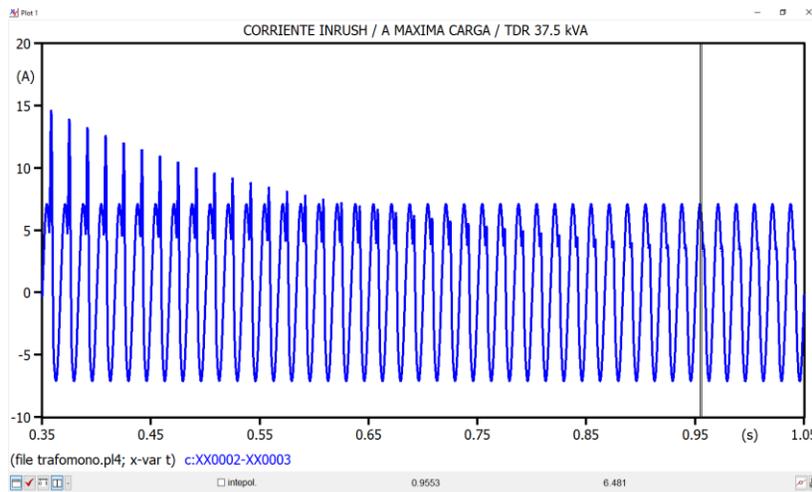


Figura 25. Ampliación a corriente de estabilización (carga al 100%).
Fuente: Autores.

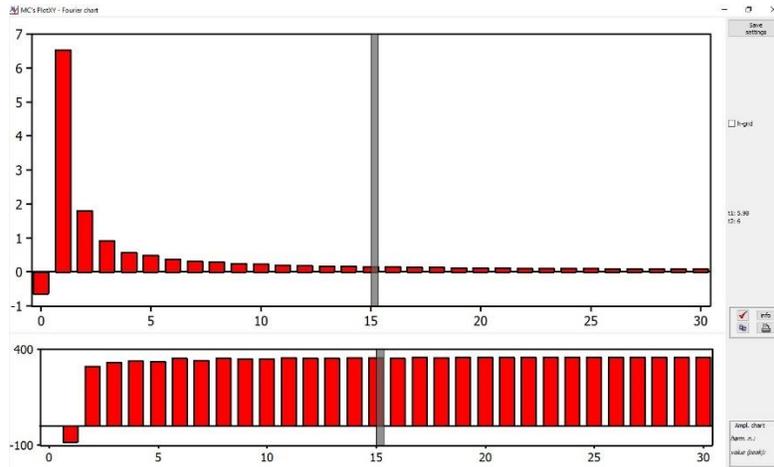


Figura 26. Armónicos de la corriente Inrush con carga al 100%.
Fuente: Autores.

Ahora se establece los tiempos de cierre para el suiche (S1) gracias a la figura 27 donde se encuentra el tiempo gracias al punto más alto de la sinusoidal.

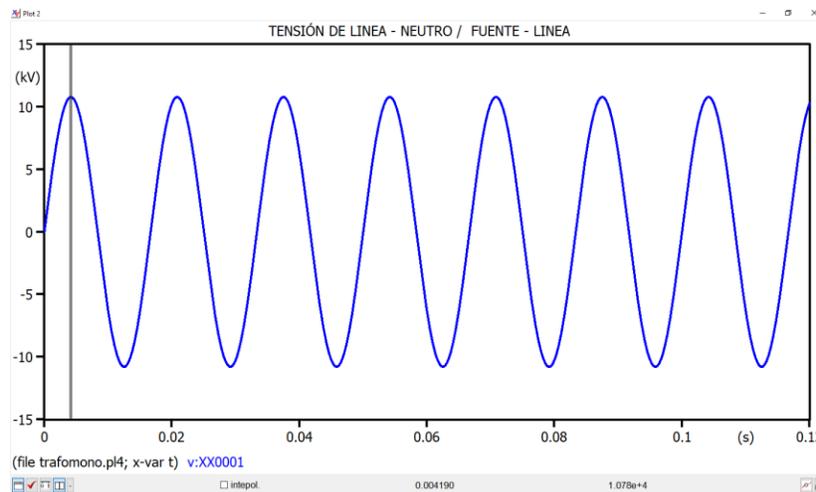


Figura 27. Tiempo de cierre para el suiche (S1).
Fuente: Autores.

Nuevamente se volverá hacer la prueba en vacío, teniendo en cuenta el tiempo de disparo del suiche (S1). Los resultados se ven en las figuras 28 y 29.

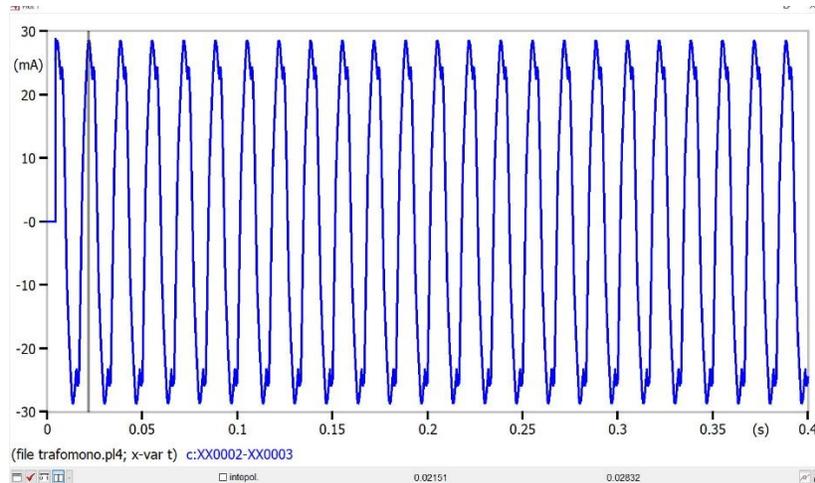


Figura 28. Grafica de corriente Inrush con carga en vacío y tiempo de accionamiento de S1.
Fuente: Autores.

Ahora se halla la corriente en vacío para verificar con la gráfica si está bajo los parámetros indicados, esto bajo las siguientes ecuaciones.

$$I_{0.AT} = \%I_0 * I_p \quad (37)$$

$$I_{0.AT} = 0.02 * 4.92S = 0.0984A \approx 98.4mA \quad (37.1)$$

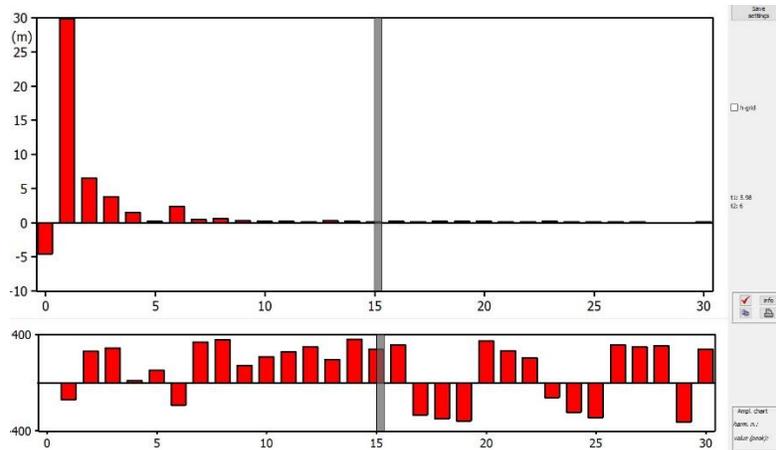


Figura 29. Armónicos de la corriente Inrush con carga en vacío y tiempo de accionamiento de S1.

Fuente: Autores.

Se hace la prueba carga máxima 100%, teniendo en cuenta el tiempo de disparo del suiche (S1). Los resultados se ven en las figuras xxx.

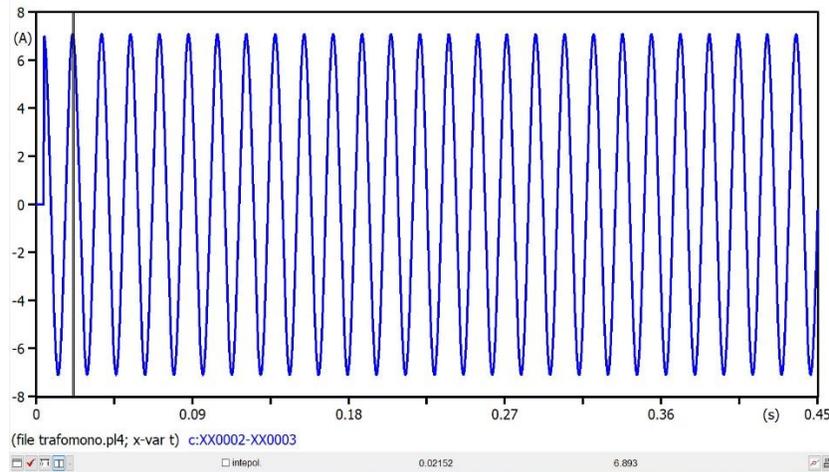


Figura 30. Grafica de corriente Inrush con carga al 100% y tiempo de accionamiento de S1.

Fuente: Autores.

Ahora se halla la corriente en carga al 100% para verificar con la gráfica si está bajo los parámetros indicados, esto bajo las siguientes ecuaciones.

$$I_{nompico} = \sqrt{2} * I_p \quad (38)$$

$$I_{nompico} = \sqrt{2} * 4.92A = 6.96A \quad (38)$$

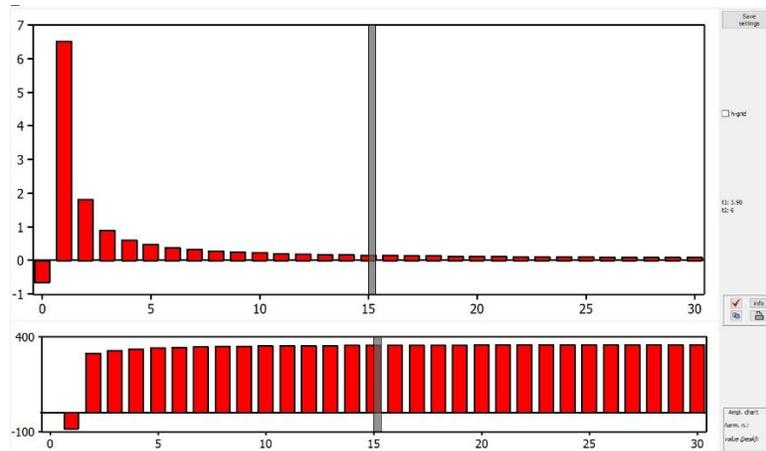


Figura 31. Armónicos de la corriente Inrush con carga al 100% y tiempo de accionamiento de S1.

Fuente: Autores

6.2. Transformador monofásico de 150kVA saturable

Para este transformador debemos tener presente varios datos importantes que son necesarios para aplicarlo al software, como lo son: Los voltajes del primario y secundario, la resistencia de los devanados primario y secundario, la inductancia del primario y secundario, La corriente en vacío, la resistencia de pérdidas en el hierro, flujo magnético y la curva de magnetización,

Ya con esto presente, se puede ver en el anexo B los datos de placa que se necesitaran para el modelado en el software.

Debido a que no se cuenta con cierta información desde la placa del transformador esta se asume desde los datos del fabricante que se encuentran en el anexo A. Todos estos datos están planteados en la tabla 1.

Tabla 4.
Datos del transformador 150kVA

Datos de placa								
VA	V1AT (V)	V2BT (V)	Ip (A)	Is (A)	Zcc (%)	Io (%)	Pnu.BT (W)	f (Hz)
150000	13200	214	6.56	405.17	4	2.4	450	60

Fuente: Diseño propio

Nota: Los datos Zcc, Io y Pnu.BT Fueron tomados del anexo A

Ahora para hallar los datos necesarios para colocar en el software se debe realizar algunas ecuaciones, por tal motivo y para tener una idea más clara de donde salen los resultados en la figura 32 colocaremos el modelo de un transformador para bajas frecuencias.

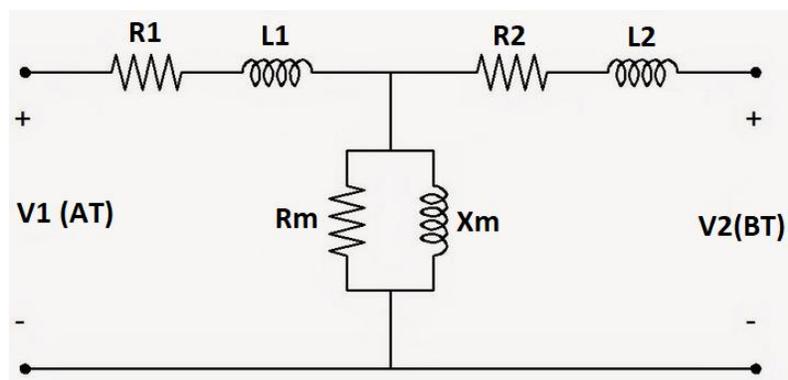


Figura 32. Modelo de transformador de baja frecuencia.

Fuente: Autores

Considerando que el transformador es saturable no se considera el valor de X_m . Por tanto, empieza con los cálculos para el lado de AT.

6.2.1. **Cálculos en AT.** Para esto se hará una serie de fórmulas descritas por las siguientes ecuaciones.

$$Z_{cc} = 4\% \approx \frac{X}{R} = 4 \quad (16)$$

$$V_{cc.fase} = (Z_{cc}/100) * V_{nom.fase} \quad (16)$$

$$Z_{baseAT} = \frac{V_{AT}^2}{S} \quad (17)$$

$$Z_{serieAT} = \left(\frac{Z_{cc}}{100}\right) * Z_{baseAT} \quad (18)$$

$$X_{L1.AT} = \frac{Z_{serieAT}}{2} \quad (19)$$

$$L_1 = \frac{X_{L1.AT}}{(2\pi f)} \quad (20)$$

$$R_1 = \frac{X_{L1.AT}}{\left(\frac{X}{R}\right)} \quad (21)$$

Aplicando las ecuaciones mencionadas anteriormente se muestran los resultados en la tabla 5.

Zbase.AT (Ω)	Zserie.AT (Ω)	XL.AT (Ω)	L1 (mH)	R1 (Ω)
1161,60	46,46	23,23	61,62	5,81

6.2.2. **Cálculos en BT.** Para esto se hará una serie de fórmulas descritas por las ecuaciones.

$$Z_{baseBT} = \frac{V_{BT}^2}{S} \quad (22)$$

$$Z_{serieBT} = \left(\frac{Z_{cc}}{100}\right) * Z_{baseBT} \quad (23)$$

$$X_{L2} = \frac{Z_{serieBT}}{2} \quad (24)$$

$$L_2 = \frac{X_{L2}}{(2\pi f)} \quad (25)$$

$$R_2 = \frac{X_{L1}}{\left(\frac{X}{R}\right)} \quad (26)$$

Aplicando las ecuaciones mencionadas anteriormente se muestran los resultados en la tabla 5.

Zbase.BT (Ω)	Zserie.BT (Ω)	XL.BT (Ω)	L2 (mH)	R2 (Ω)
0,3053	0,0122	0,0061	0,0162	0,0015

6.2.3. **Rama de magnetización.** Para esto se hará una serie de fórmulas descritas por las ecuaciones. Hallando en primer lugar las corrientes nominales de línea y fase.

$$I_{nom.AT.linea} = \frac{s}{(V_{AT}*\sqrt{3})} \quad (27)$$

Como el devanado de AT esta en delta aplicamos la siguiente ecuación.

$$I_{nom.AT.fase} = \frac{I_{nom.AT.linea}}{\sqrt{3}} \quad (27)$$

Ahora hallamos en BT que se encuentra conectado en estrella.

$$I_{nom.BT.linea} = I_{nom.BT.fase} = \frac{s}{(V_{BT}*\sqrt{3})} \quad (27)$$

Ahora los valores para la prueba en vacío están dados por las siguientes ecuaciones.

$$I_{o.AT.fase} = \%Z_{cc} * I_{nom.AT.fase} \quad (27)$$

$$I_{o.AT.línea} = \%Z_{cc} * I_{nom.AT.línea} \quad (27)$$

$$I_{o.BT.línea} = \%Z_{cc} * I_{nom.BT.línea} \quad (27)$$

Los resultados se muestran en la tabla 6.

Inom.AT.Línea (A)	Inom.AT.Fase (A)	Inom.BT.Línea (A)	Io.AT.Línea (A)	Io.AT.fase (A)	Io.BT.Línea (A)
6,56	3,79	404,68	0,16	0,09	9,71

Para calcular R_m (Núcleo), X_m no se halla porque es saturable, Tendremos las siguientes ecuaciones

$$Y_{ex.AT} = \frac{I_{o.AT.fase}}{V_{AT}} \angle - \arccos \left(\frac{s}{V_{AT} * I_{o.AT.fase}} \right) \quad (27)$$

$$Y_{ex.BT} = \frac{I_{o.BT.Línea}}{V_{BT}} \angle - \arccos \left(\frac{s}{V_{BT} * I_{o.BT.Línea}} \right) \quad (27)$$

$$R_m = \frac{1}{Y_{ex.AT}} \quad (27)$$

$$R_m = \frac{1}{Y_{ex.BT}} \quad (27)$$

Los resultados se muestran en la tabla 7.

Yex.AT	RM.AT (Ω)	Yex.BT	RM.BT (Ω)
2,86961E-06	348480	0,108924498	9,180671155

Fuente: Diseño propio

Nota: Los resultados se toman de las ecuaciones antes resueltas.

6.2.4. Configuración del simulador. Con todos los datos del transformador listo, se hace el ensamble en el programa ATP-Draw como se muestra en la figura 33. En este caso se hará 3 simulaciones, Una de ellas es en vacío, con carga al 100% y otra realizando un cambio en los tiempos en el Suiche (S1), donde se realizará un control de la corriente Inrush.

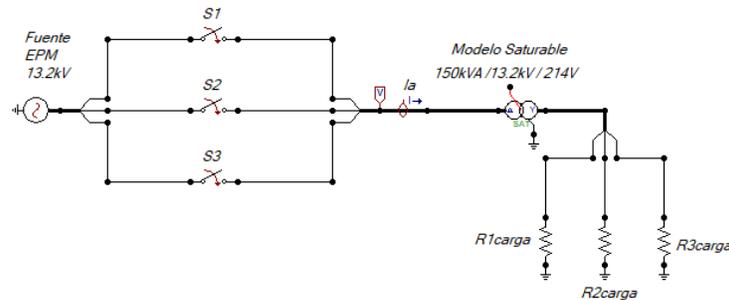


Figura 33. Modelado en programa de transformador trifásico de 150kVA.

Fuente: Autores

En las figuras 34, 35, 36, 37, 38, 39, 40, 41 y 42 se podrán verificar las configuraciones de cada uno de los componentes del circuito.

También es importante tener en cuenta los datos de magnetización del núcleo del transformador dadas en la tabla 8.

Tabla 5.

Datos de magnetización del transformador de 150kVA.

Construcción de la curva de saturación magnética del núcleo

Valores tomados de internet		Valores para ATP-Draw		
VCA.BR(V)	ICA.BT(A)	VCA.AT(V)	ICA.AT(A)	ØAT (wb.esp)
60,040	0,116	1906,270	0,00366	7,151
120,080	0,189	3812,540	0,00596	14,302
180,120	0,252	5718,810	0,00795	21,453
210,140	0,335	6671,945	0,01056	25,029
240,160	0,681	7625,080	0,02143	28,604
255,170	1,440	8101,648	0,04535	30,392
277,690	10,038	8816,658	0,31617	33,074
300,200	78,671	9531,350	2,47782	35,755
315,210	318,102	10007,918	10,01896	37,543

Fuente: Diseño propio

Nota: Se aplicaron las ecuaciones 31, 32, 33 y 34 para llenar los valores para el software ATP-Draw.

Los datos se sacan gracias a las ecuaciones dadas a continuación.

$$\alpha = \frac{V_{AT}}{V_{BT}} \quad (31)$$

$$V_{CA.AT} = \alpha * V_{CA.BT} \quad (32)$$

$$I_{CA.AT} = \frac{V_{CA.BT}}{\alpha} \quad (33)$$

$$\Phi_{AT} = \frac{V_{CA.AT}}{\pi f \sqrt{2}} \quad (34)$$

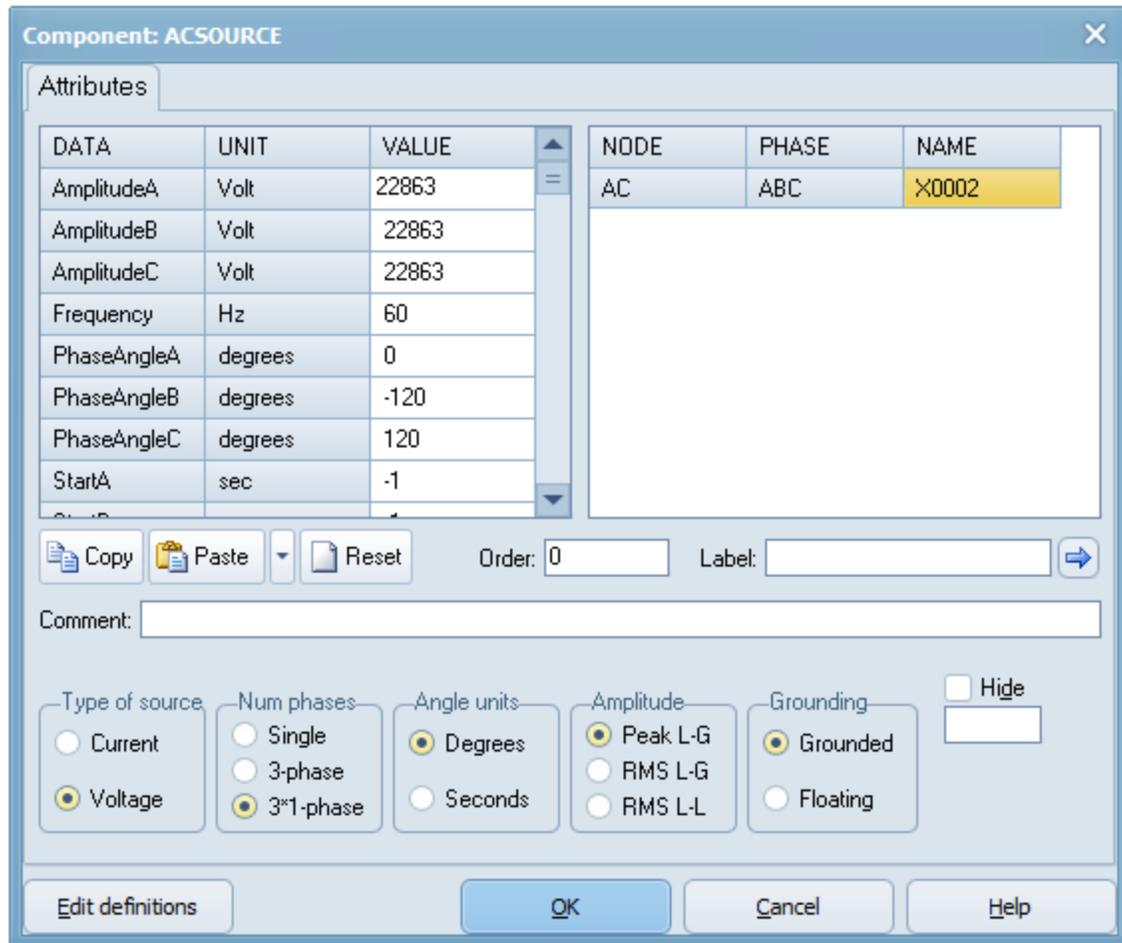


Figura 34. Fuente de EPM 13200V.

Fuente: Autores

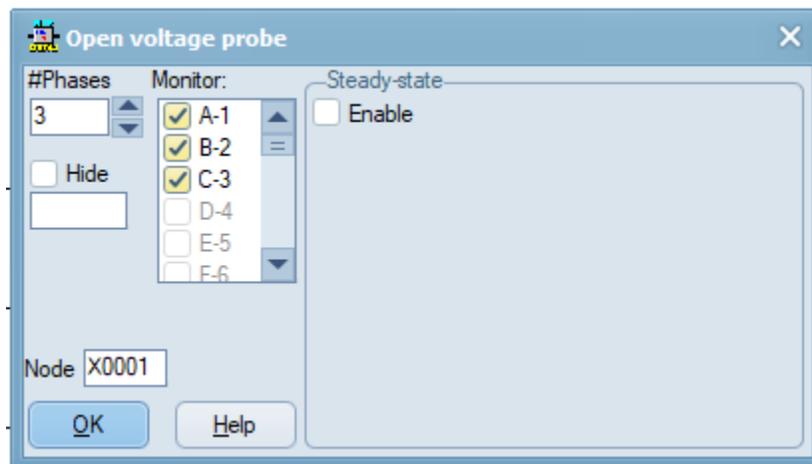


Figura 35. Probador de voltaje.

Fuente: Autores

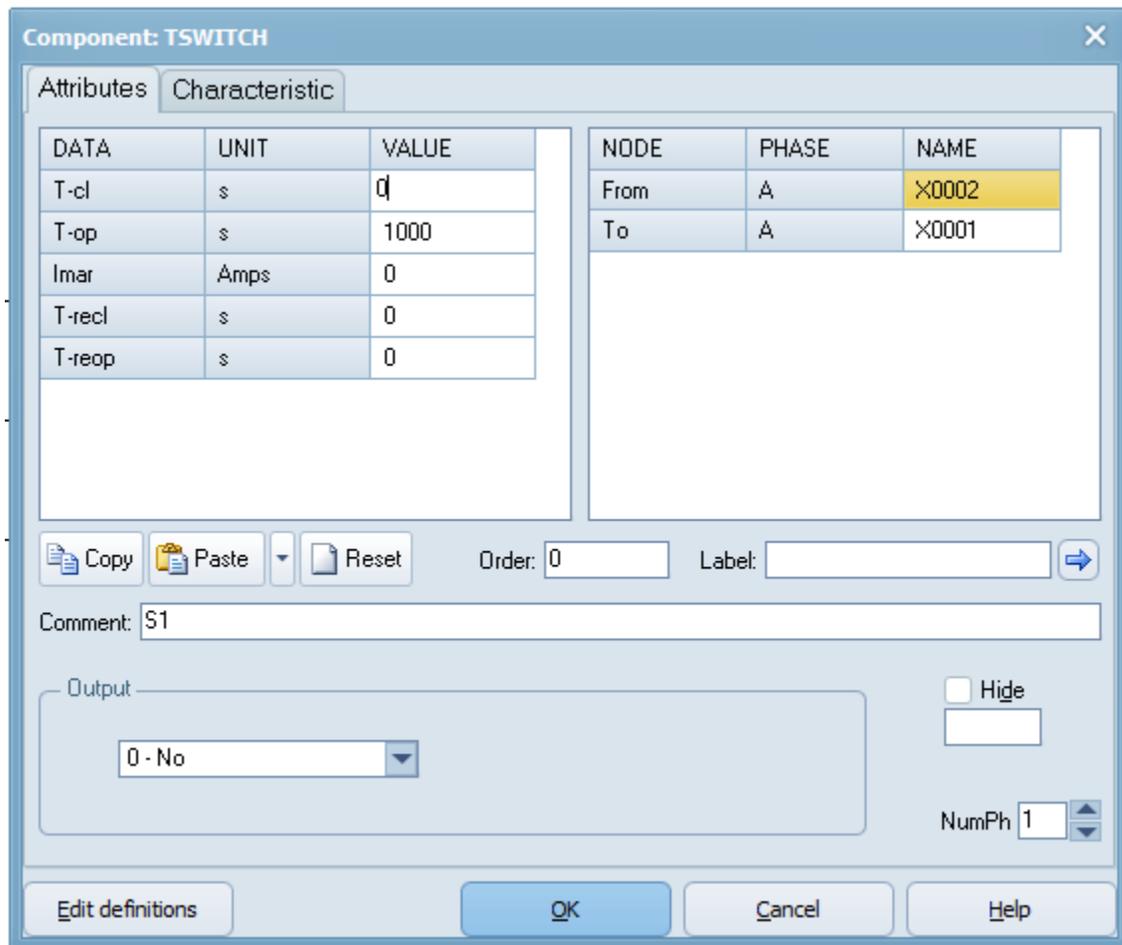


Figura 36. Suiche (S1, S2 y S3) para control de apertura y cierre de línea.
Fuente: Autores

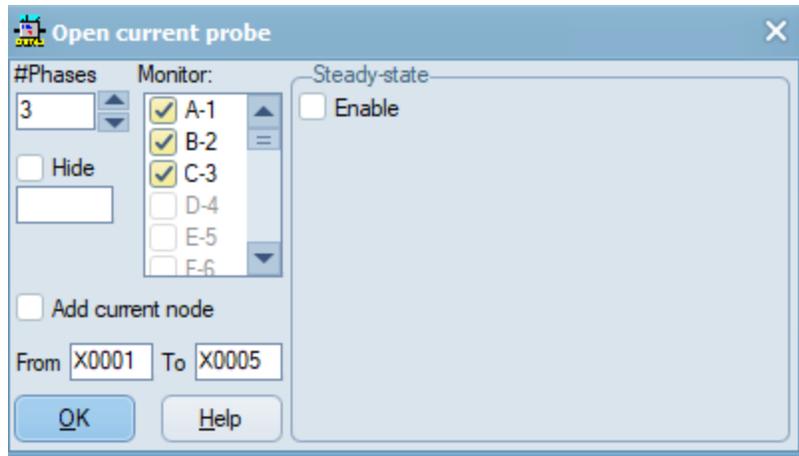


Figura 37. Probador de corriente.

Fuente: Autores

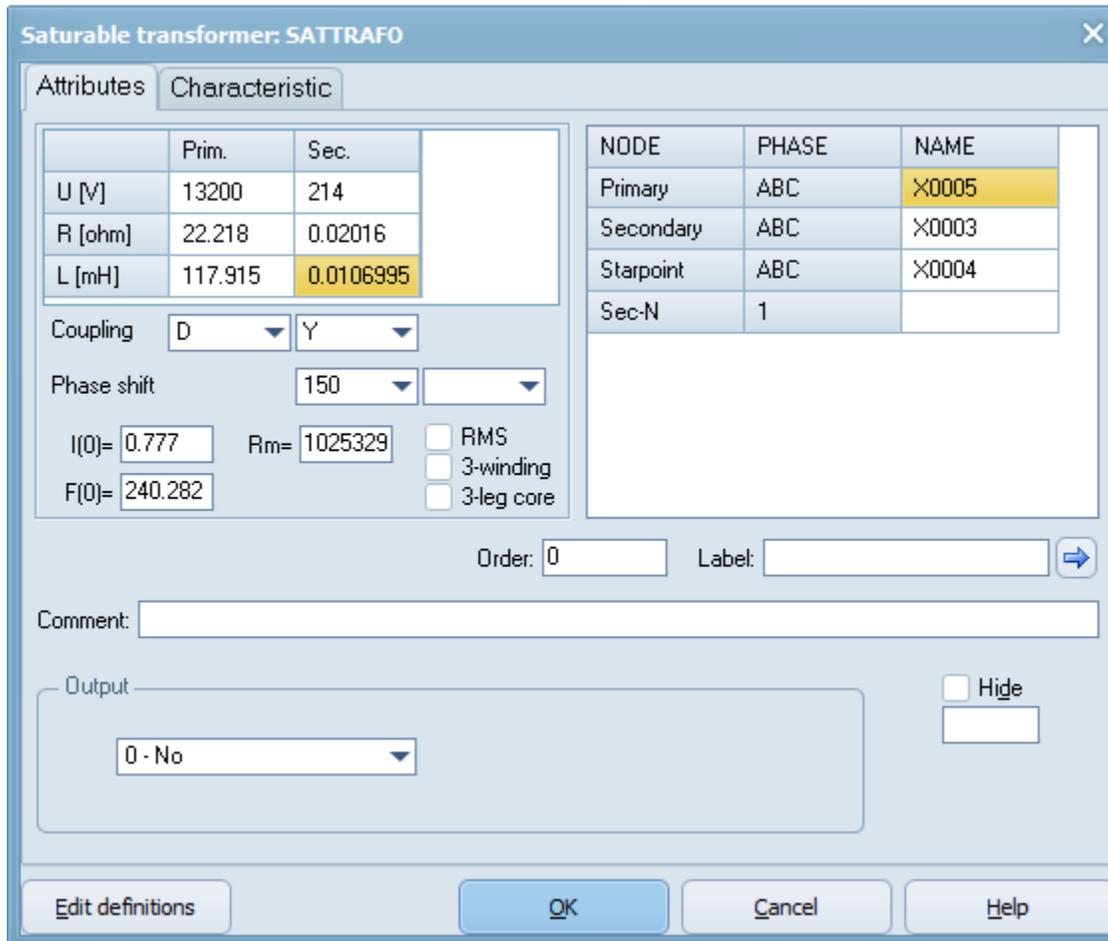


Figura 38. Datos del transformador.

Fuente: Autores

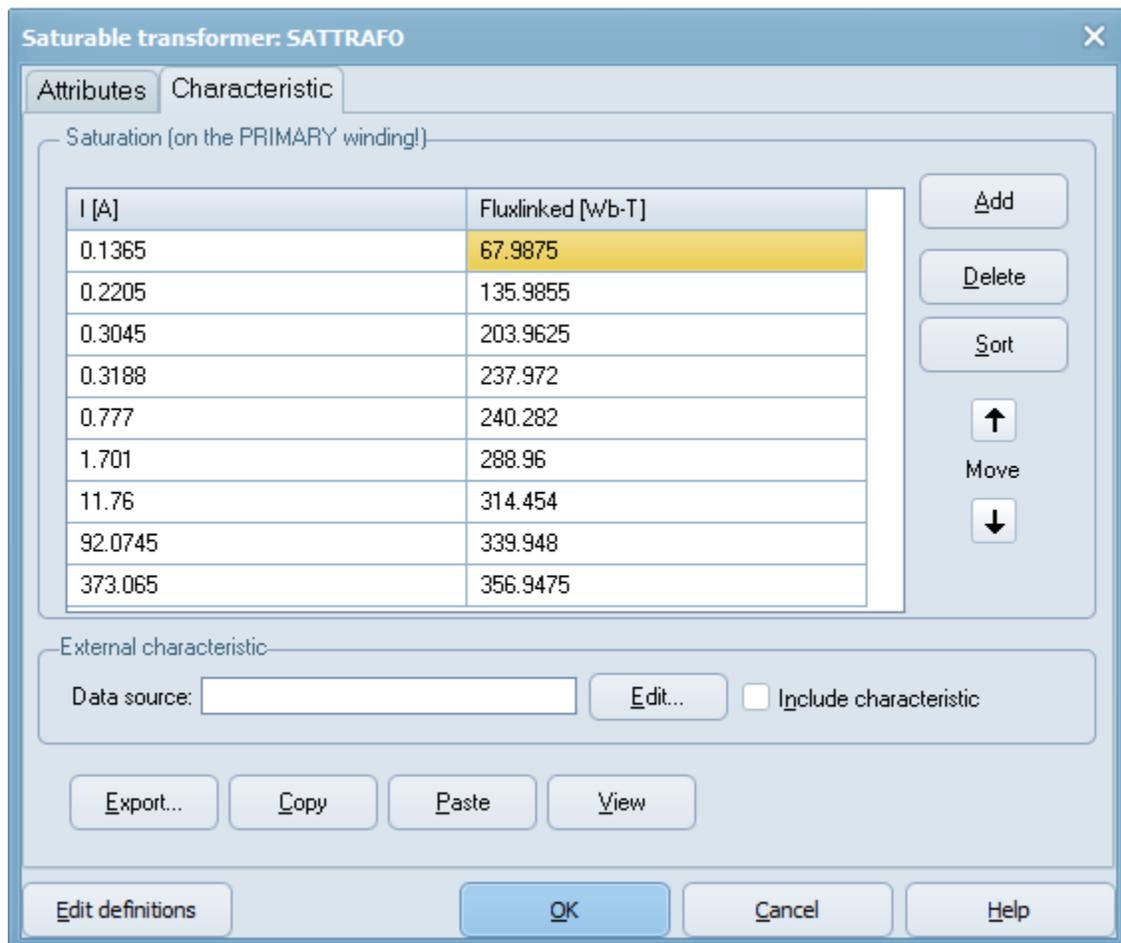


Figura 39. Datos de saturación visto desde el AT (datos tomados de la tabla 3).

Fuente: Autores

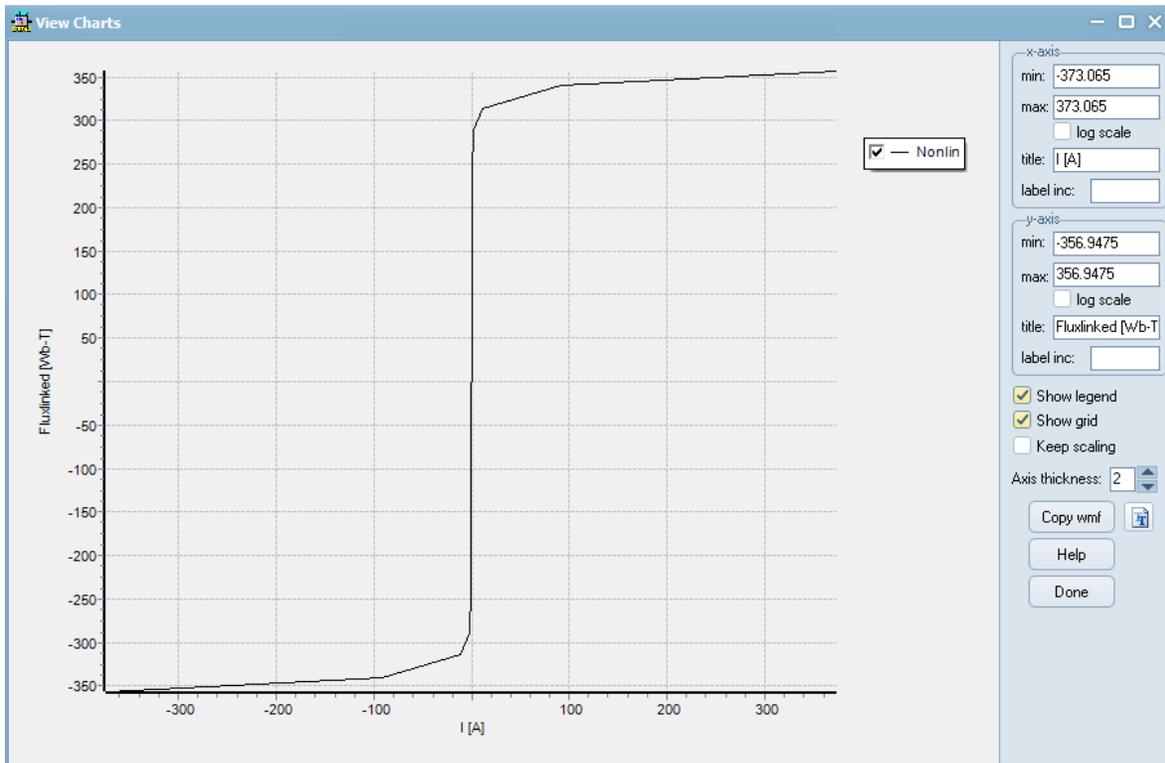


Figura 40. Grafica de saturación del núcleo del transformador de 150kVA.
Fuente: Autores.

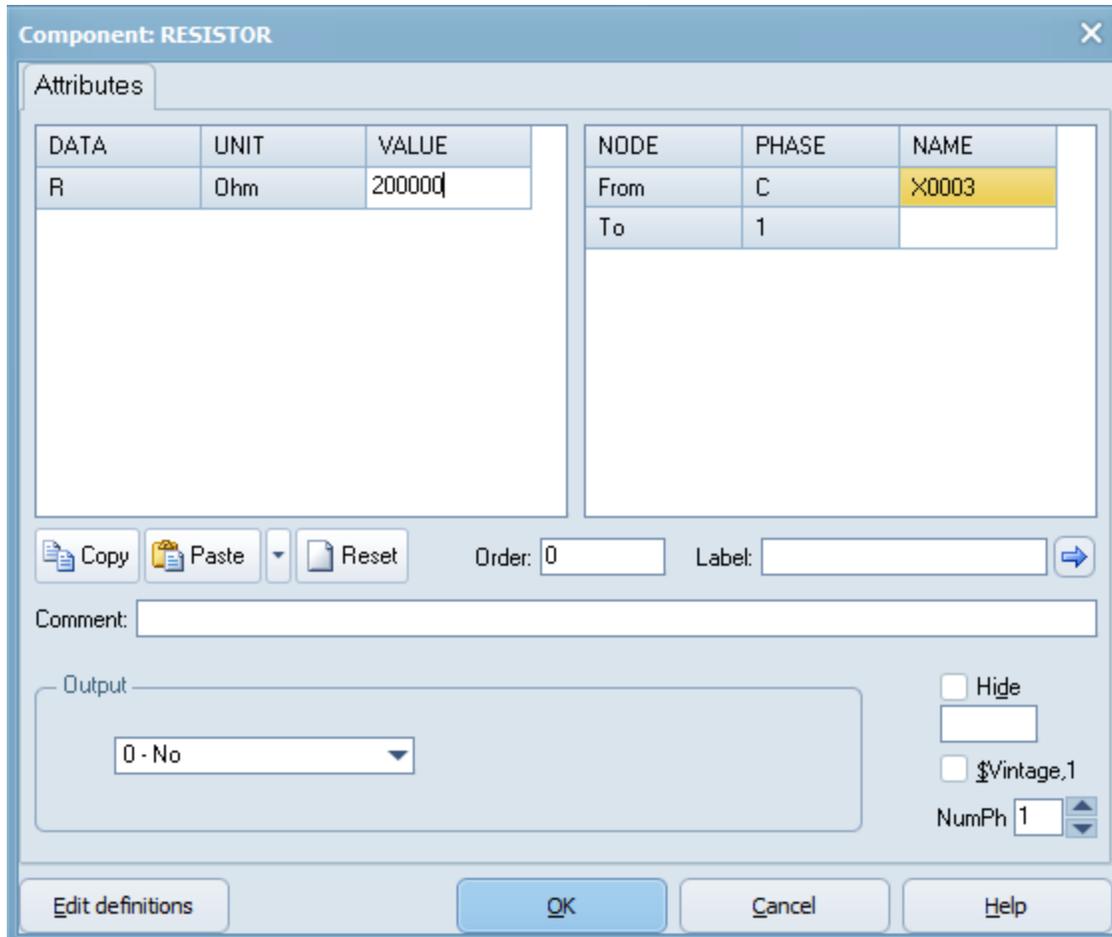


Figura 41. Simulación de carga del sistema.

Fuente: Autores

Nota: carga en vacío es de 200000 Ω y 100% de carga de 1.45 Ω

6.2.5. Simulación del transformador. Los datos obtenidos de la simulación se presentan con las figuras 20, 21, 22 y 23.

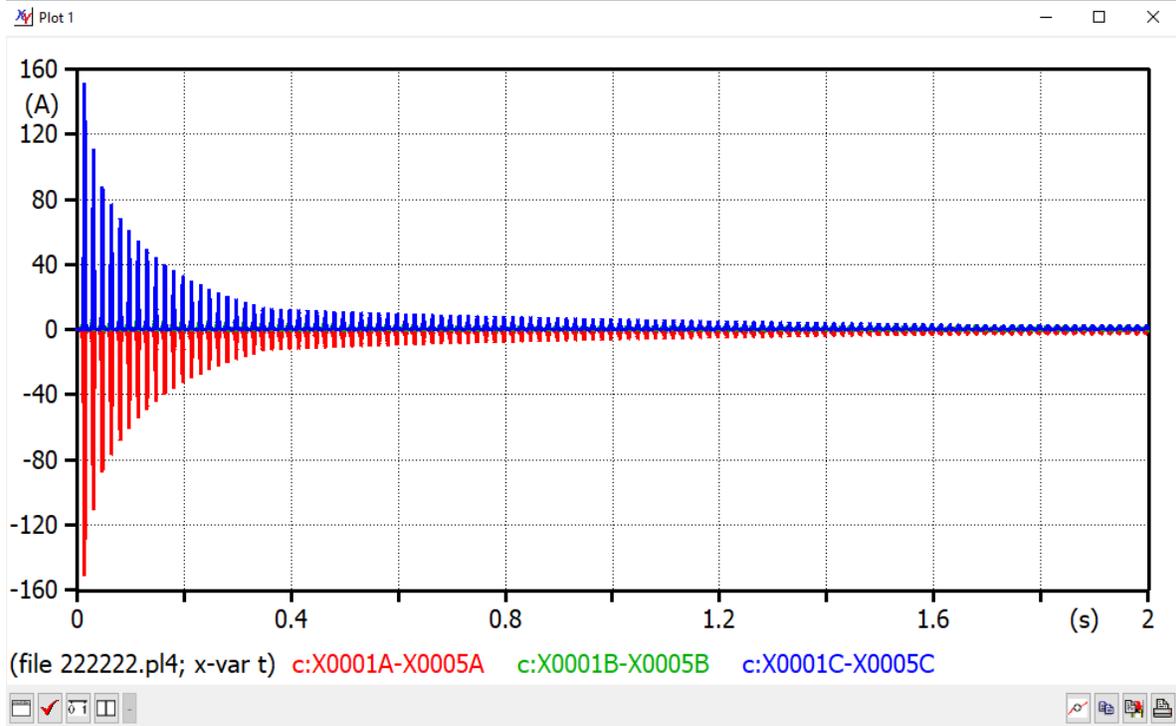


Figura 42. Grafica de corriente Inrush con carga en vacío.
Fuente: Autores

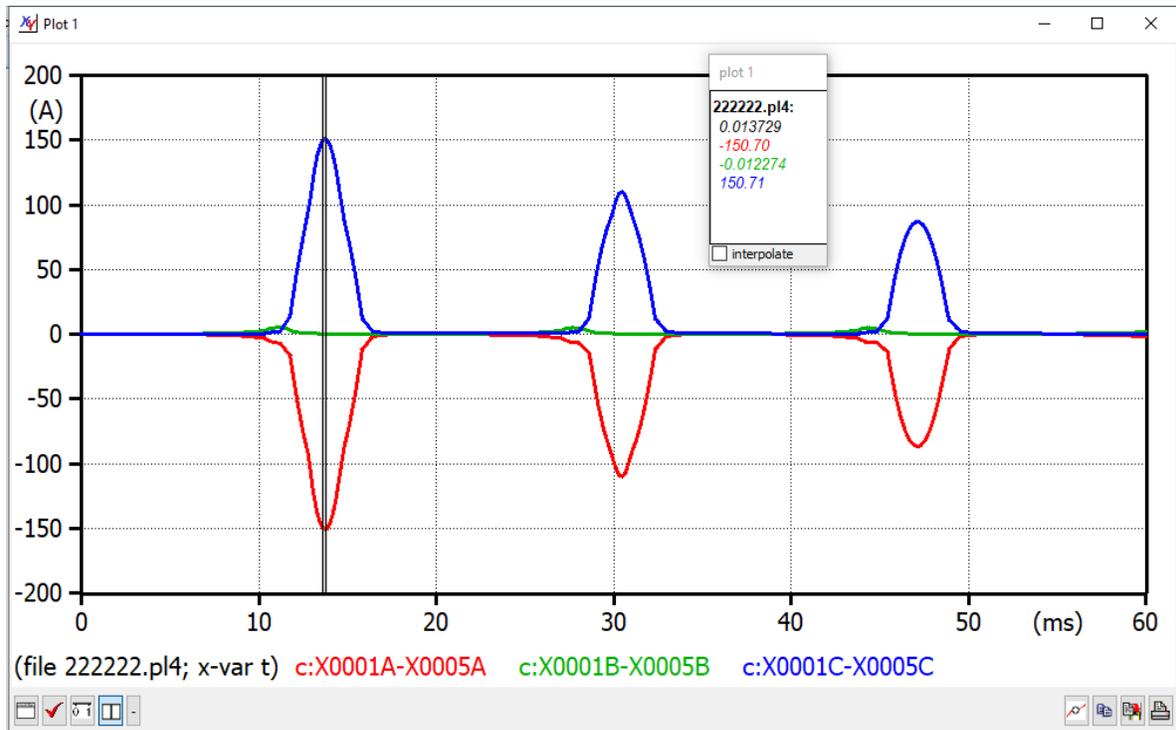


Figura 43. Ampliación del pico de corriente Inrush.

Fuente: Autores.

Con estos datos se puede determinar la cantidad de veces que sobrepasa la corriente nominal del AT y poder comparar con lo dicho en diferentes documentaciones referentes al tema, para lo cual se establecen un corriente pico (I_{pico}) de 150.71A según gráfica y establecido dicho parámetro, se procede con las siguientes ecuaciones.

$$I_{RMS} = \frac{I_{pico}}{\sqrt{3}} \quad (35)$$

$$I_{RMS} = \frac{150.71A}{\sqrt{3}} = 87.01A \quad (35.1)$$

$$Sobre corriente = \frac{I_{RMS}}{I_p} \quad (36)$$

$$Sobre corriente = \frac{87.01A}{6.56A} = 13.264 \approx 13 \text{ veces} \quad (36.1)$$

Lo cual nos indica que la sobre corriente en ese punto cuando S1, S2 y S3 se cierra cuando la sinusoidal pasa por cero. Y la estabilización se muestra en la figura 22.

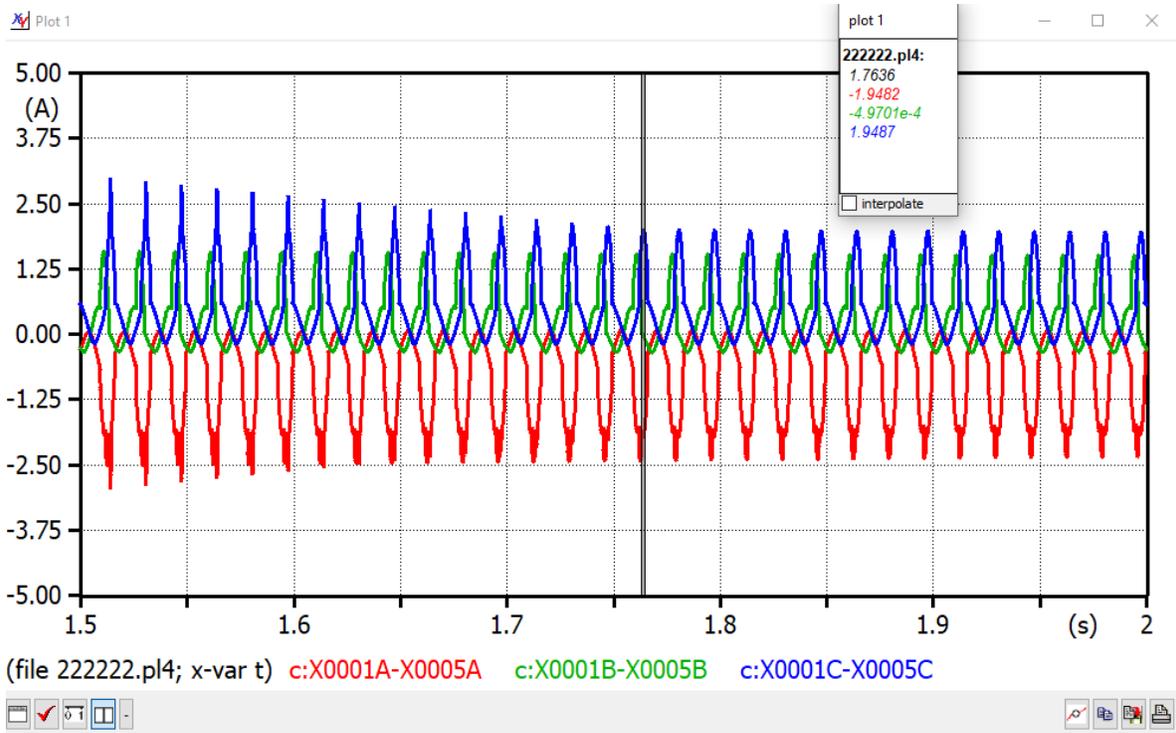


Figura 44. Ampliación a corriente de estabilización (carga en vacío).
 Fuente: Autores.

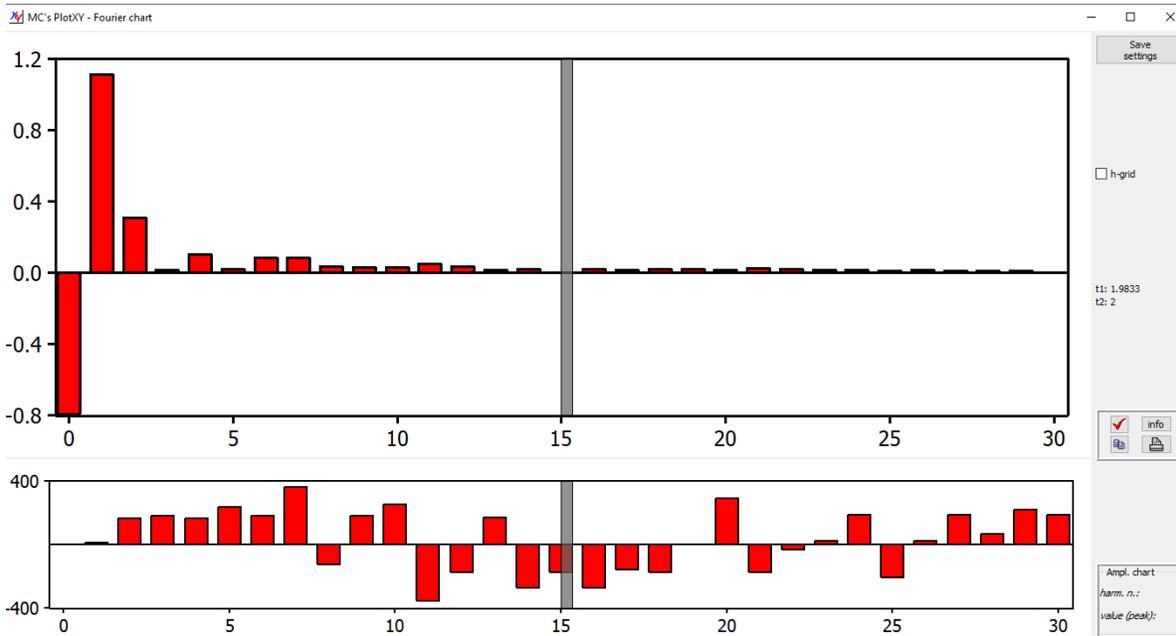


Figura 45. Armónicos de la corriente Inrush con carga en vacío fase 1.
 Fuente: Autores.

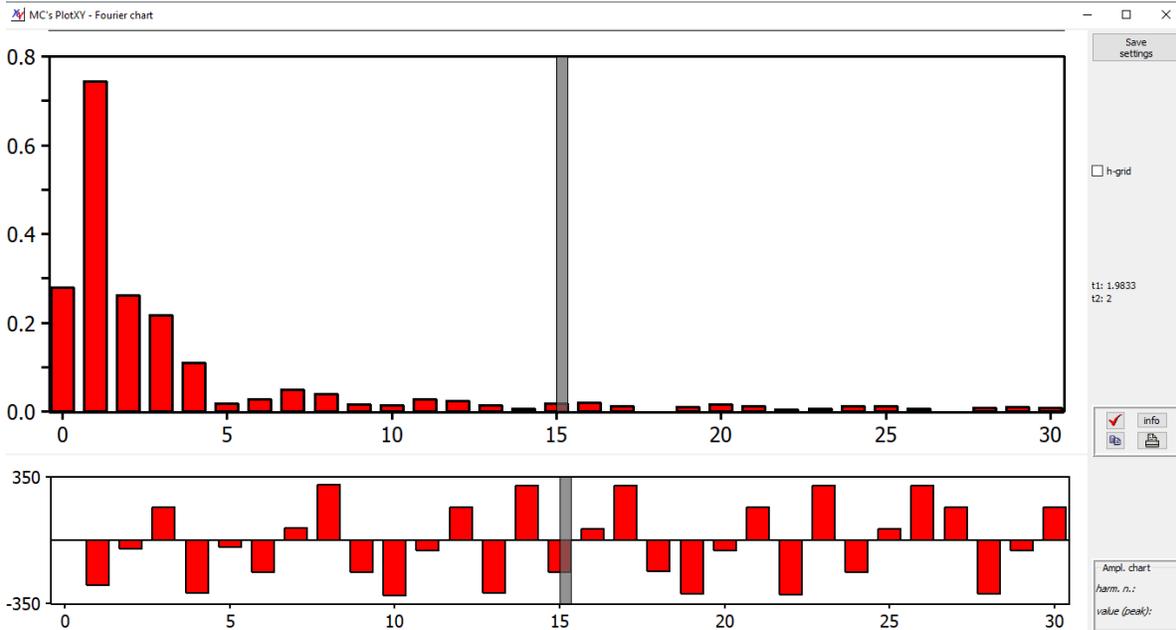


Figura 46. Armónicos de la corriente Inrush con carga en vacío fase 2.
Fuente: Autores.

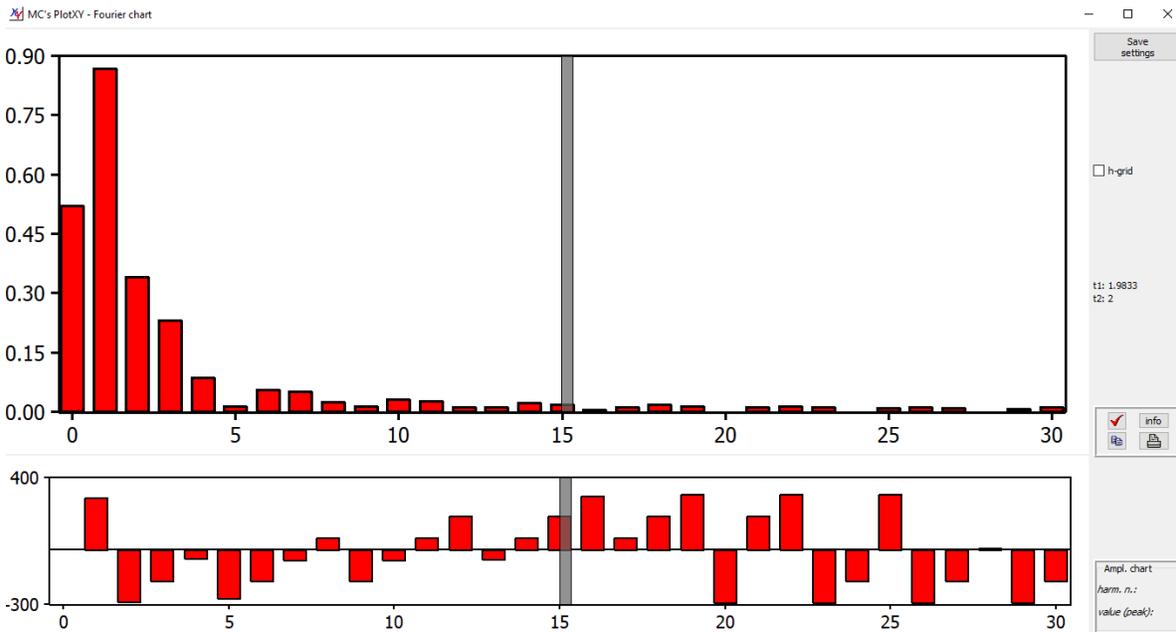


Figura 47. Armónicos de la corriente Inrush con carga en vacío fase 3.
Fuente: Autores.

Ahora la simulación se hará con la carga al 100%, esto lo podemos ver en las figuras

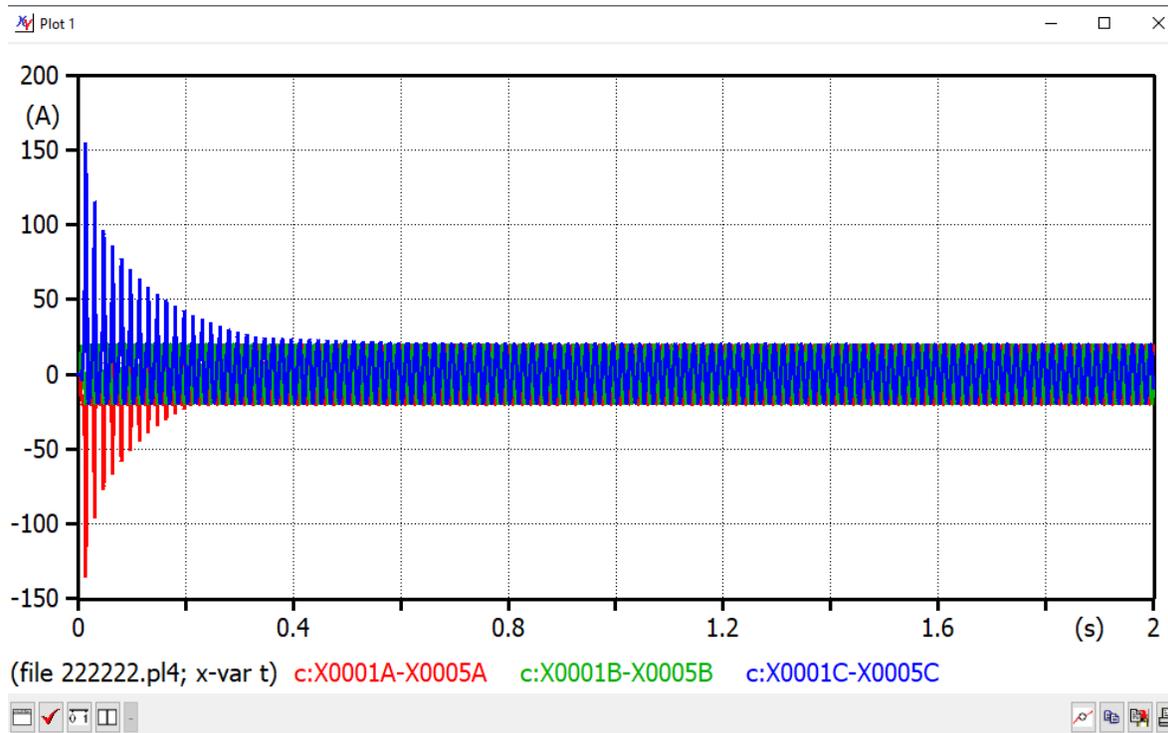


Figura 48. Grafica de corriente Inrush con carga al 100%.

Fuente: Autores.

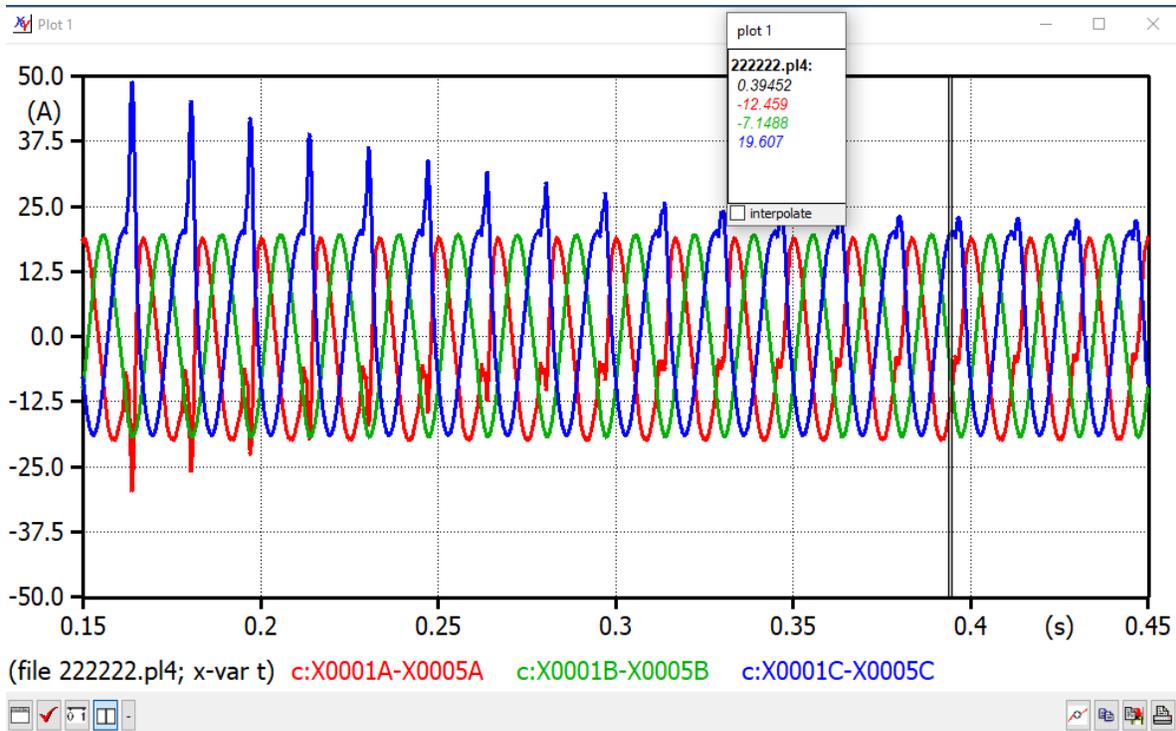


Figura 49. Ampliación a corriente de estabilización (carga al 100%).
Fuente: Autores.

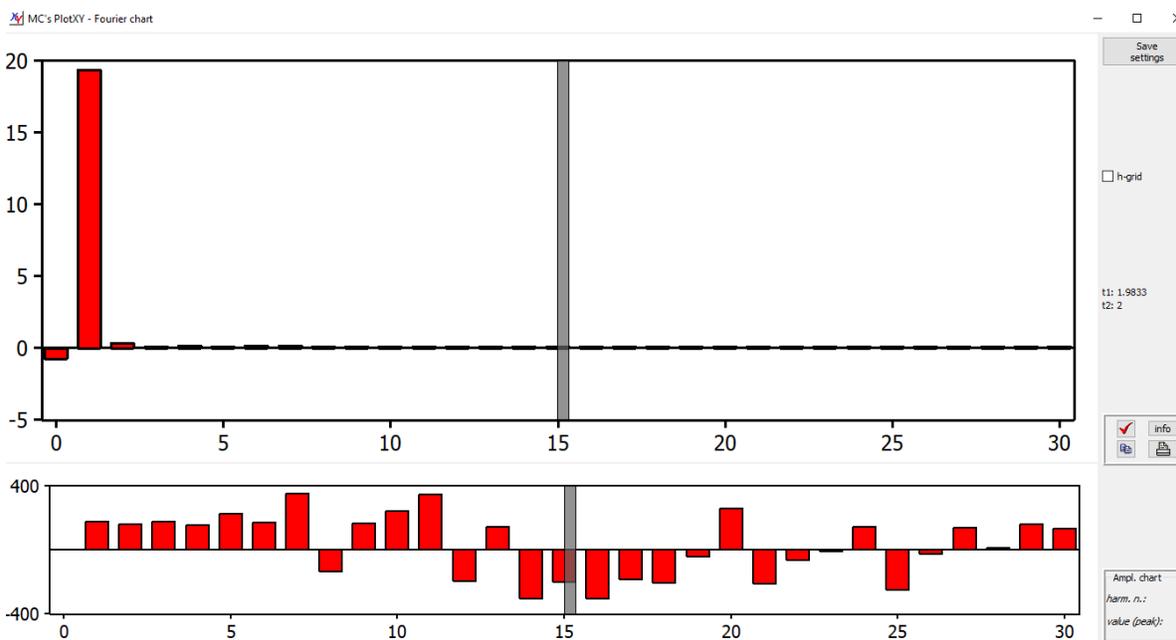


Figura 50. Armónicos de la corriente Inrush con carga al 100% fase 1.
Fuente: Autores.

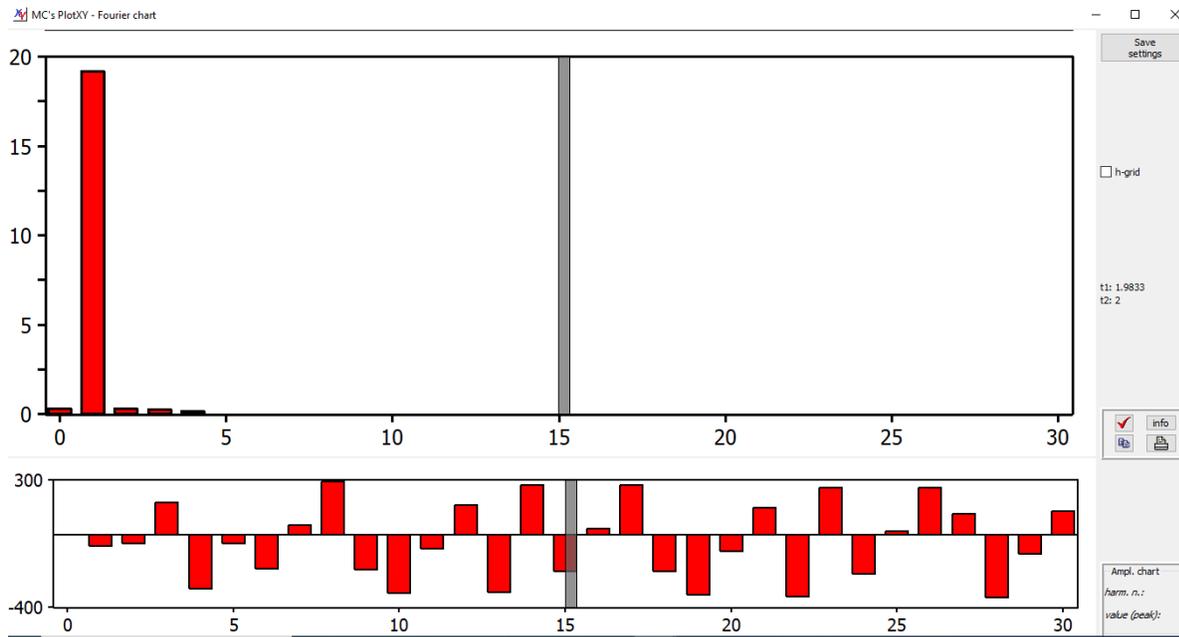


Figura 51. Armónicos de la corriente Inrush con carga al 100% fase 2.
Fuente: Autores.

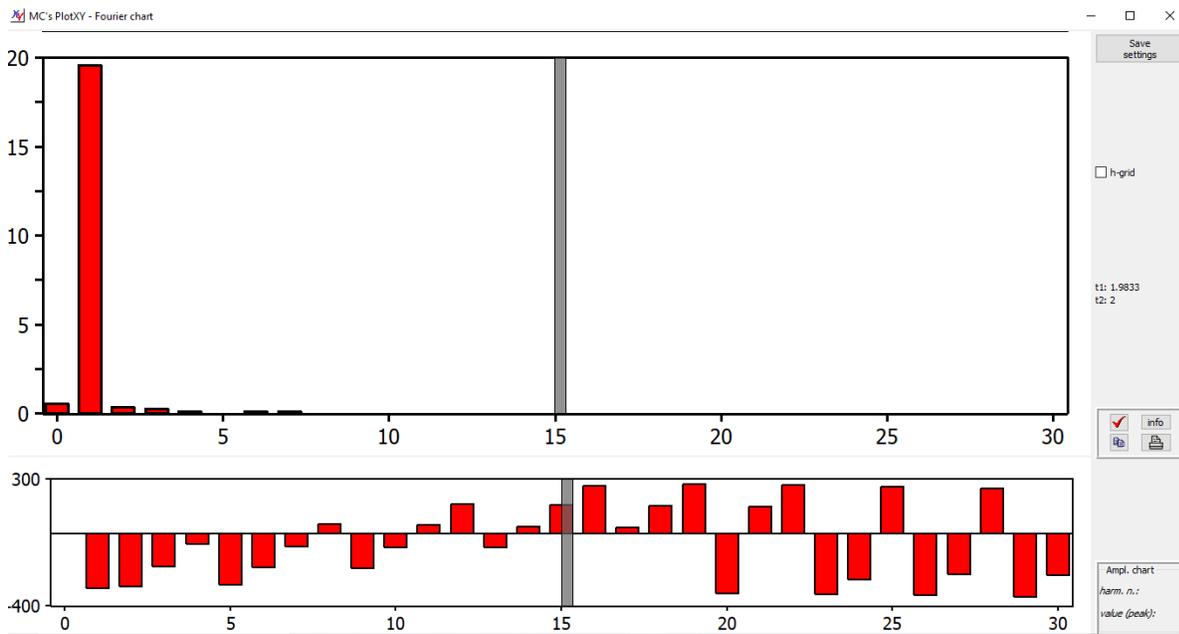


Figura 52. Armónicos de la corriente Inrush con carga al 100% fase 3.
Fuente: Autores.

Ahora se establece los tiempos de cierre para los suiche (S1, S2 y S3) gracias a la figura 27 donde se encuentra el tiempo gracias al punto más alto de la sinusoidal.

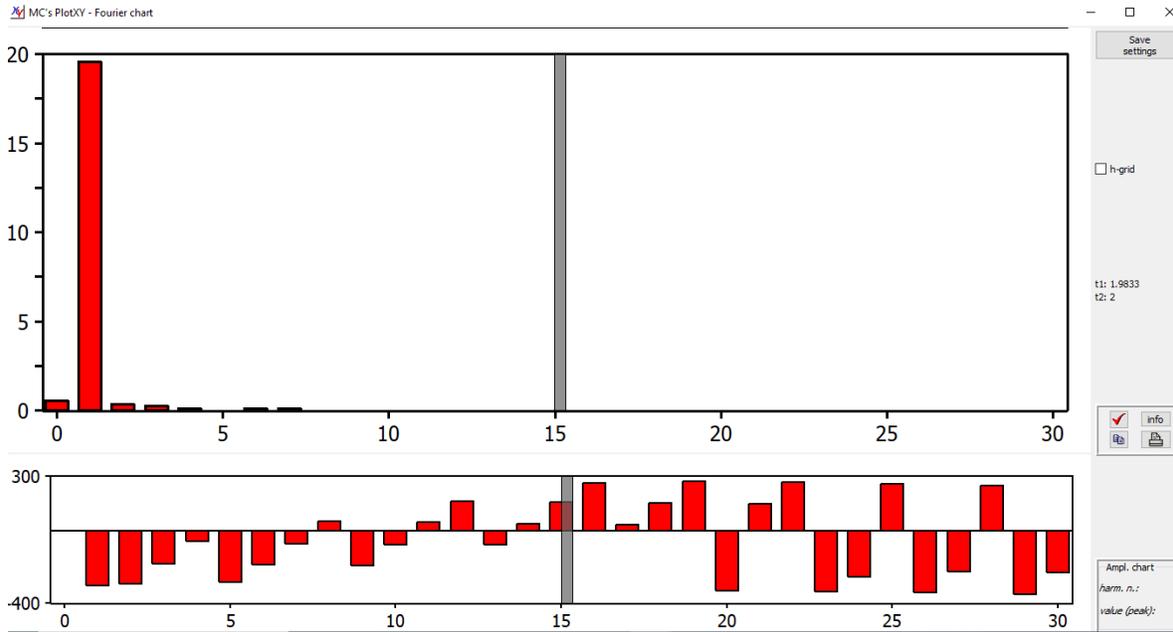


Figura 53. Tiempo de cierre para el suiche (S1, S2 y S3).
Fuente: Autores.

Nuevamente se volverá hacer la prueba en vacío, teniendo en cuenta el tiempo de disparo del suiche (S1). Los resultados se ven en las figuras 28 y 29.

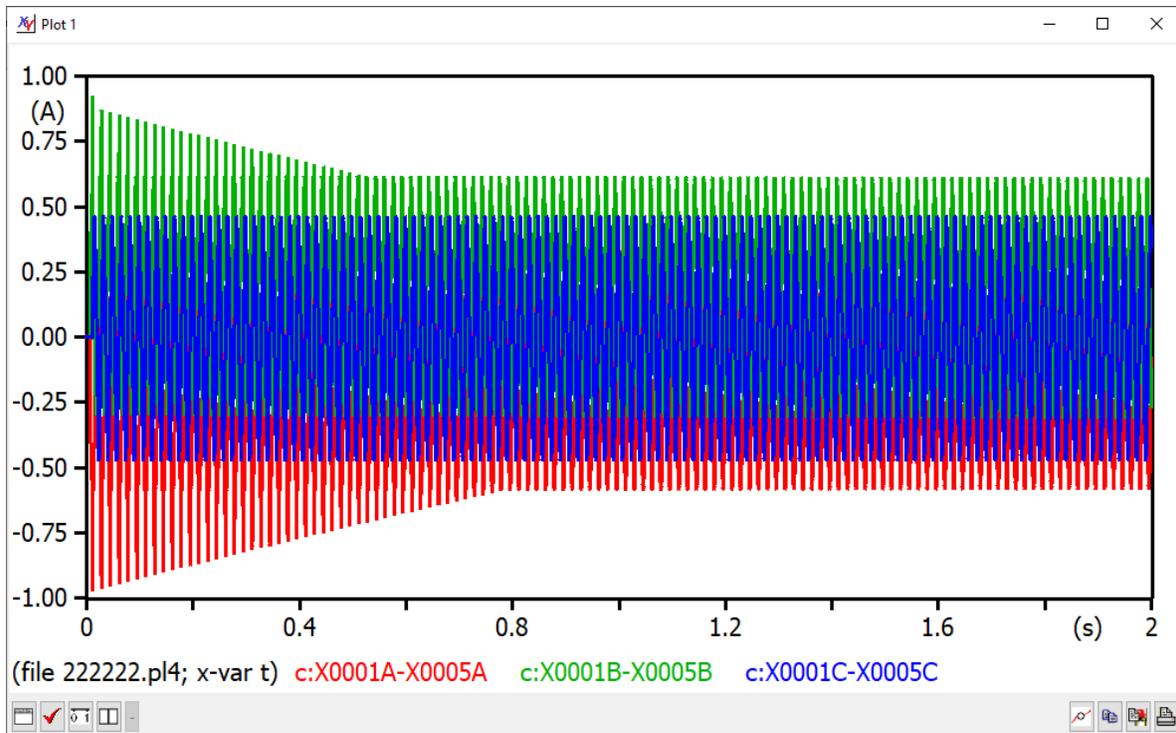


Figura 54. Grafica de corriente Inrush con carga en vacío y tiempo de accionamiento de S1, S2 y S3.

Fuente: Autores.

Ahora se halla la corriente en vacío para verificar con la gráfica si está bajo los parámetros indicados, esto bajo las siguientes ecuaciones.

$$I_{0.AT} = \%I_0 * I_p \quad (37)$$

$$I_{0.AT} = 0.02 * 4.92S = 0.0984A \approx 98.4mA \quad (37.1)$$

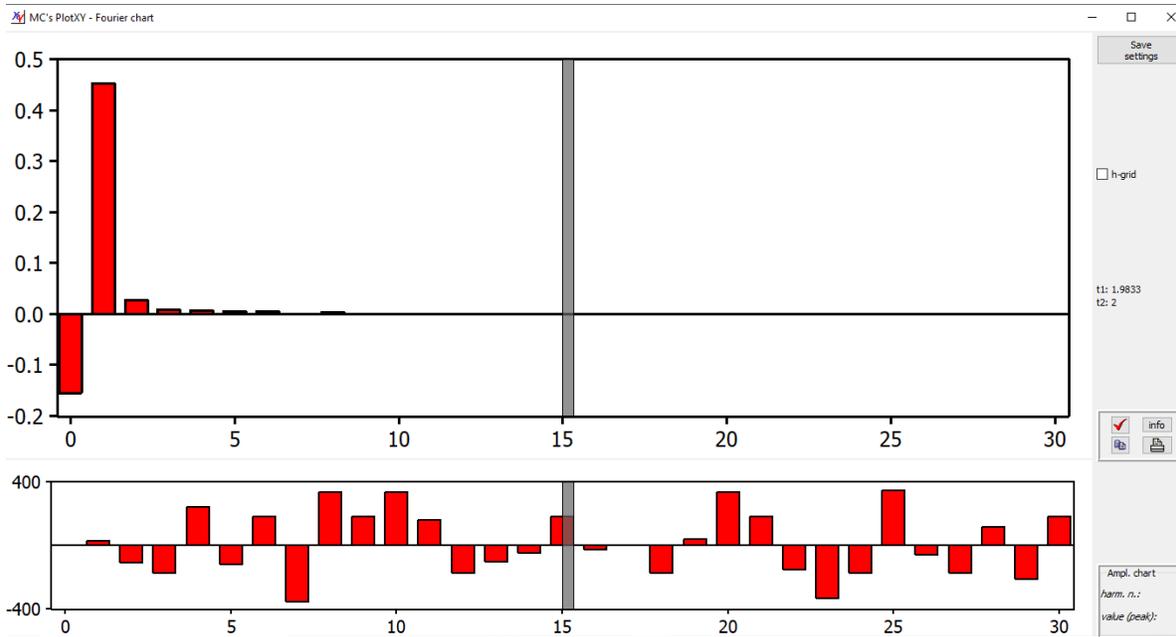


Figura 55. Armónicos de la corriente Inrush con carga en vacío y tiempo de accionamiento de S1 fase 1.

Fuente: Autores.

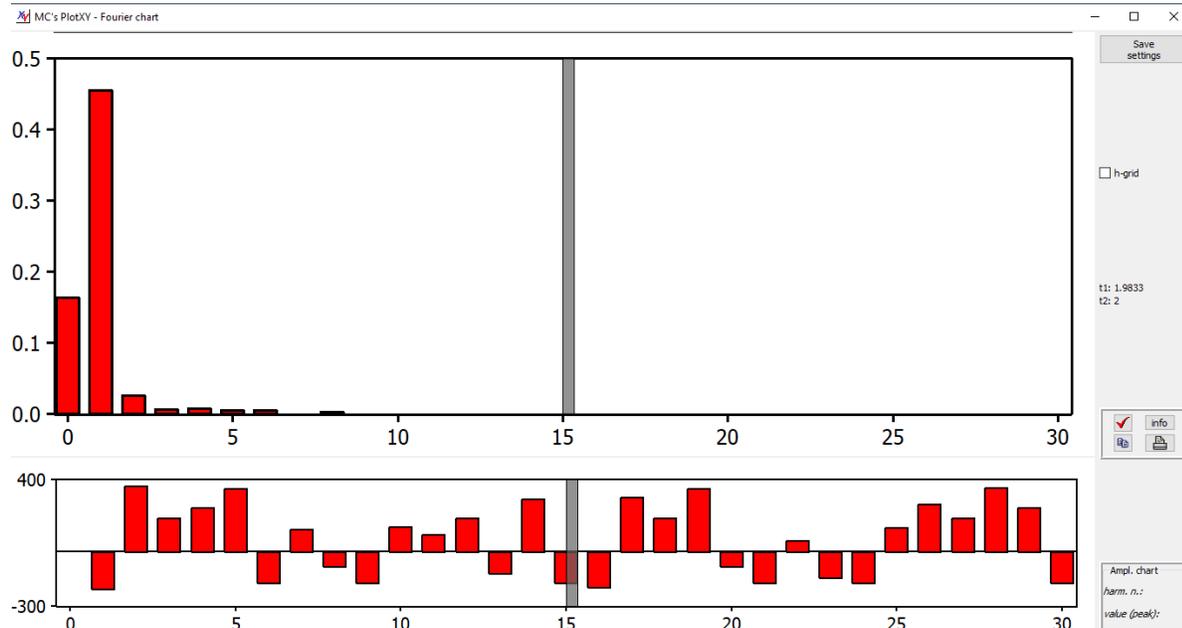


Figura 56. Armónicos de la corriente Inrush con carga en vacío y tiempo de accionamiento de S1 fase 2.

Fuente: Autores.

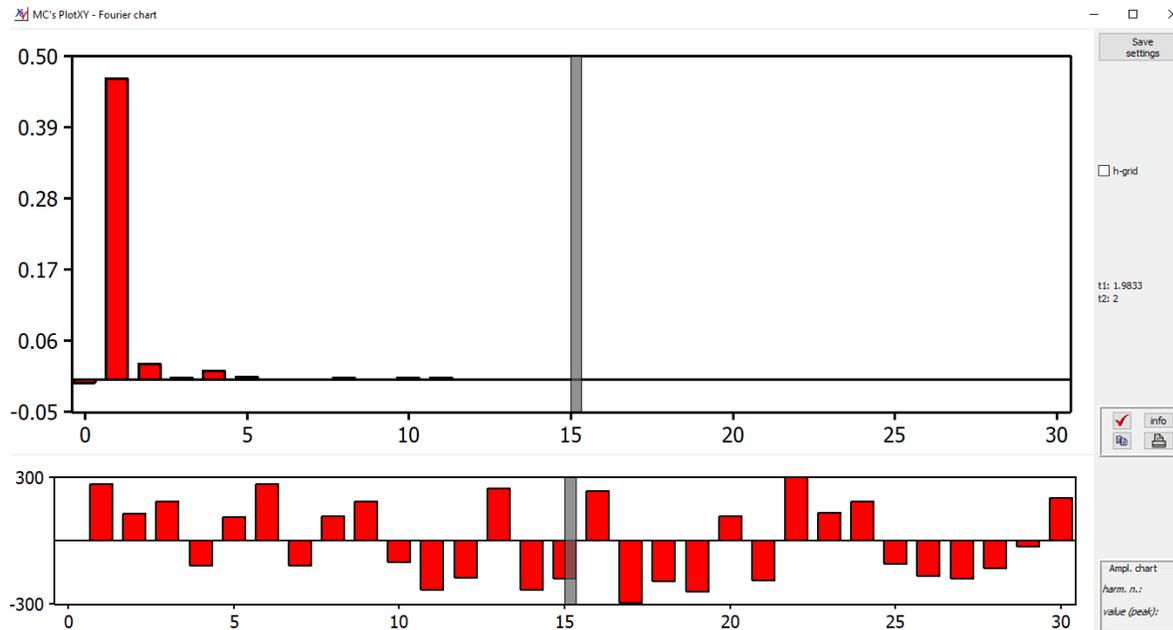


Figura 57. Armónicos de la corriente Inrush con carga en vacío y tiempo de accionamiento de S1 fase 3.

Fuente: Autores.

Se hace la prueba carga máxima 100%, teniendo en cuenta el tiempo de disparo del suiche (S1). Los resultados se ven en las figuras xxx.

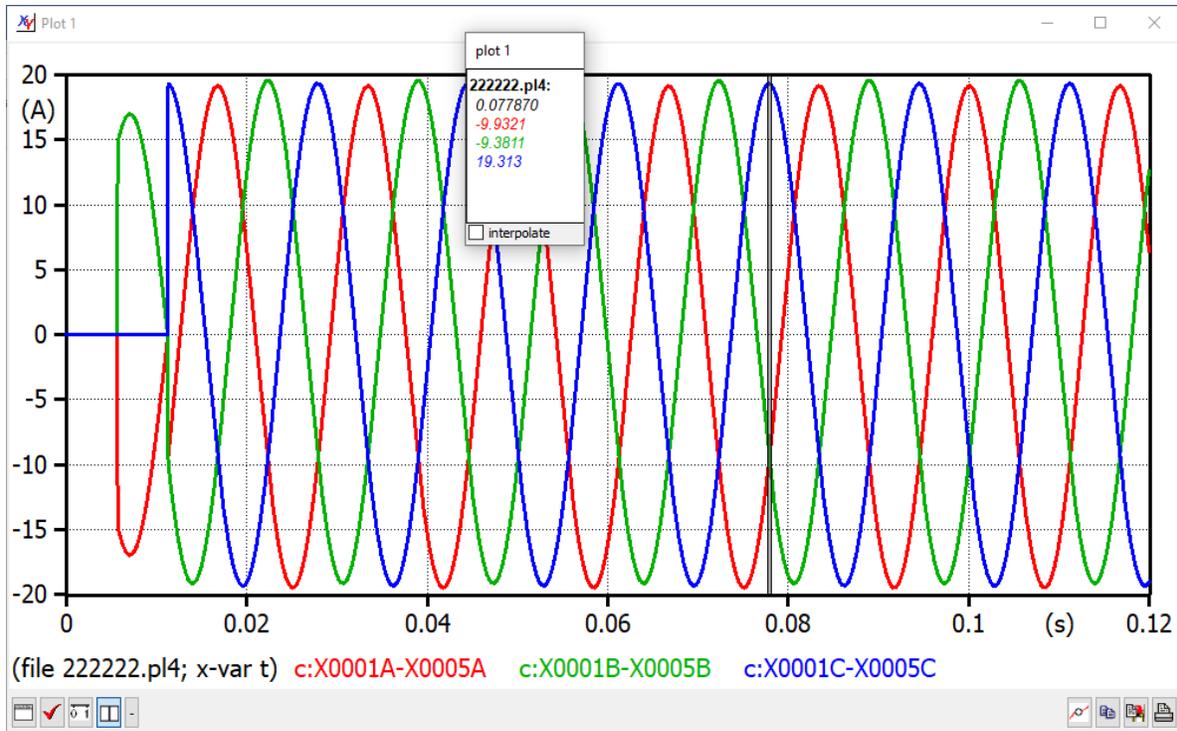


Figura 58. Grafica de corriente Inrush con carga al 100% y tiempo de accionamiento de S1, S2 y S3.

Fuente: Autores.

Ahora se halla la corriente en carga al 100% para verificar con la gráfica si está bajo los parámetros indicados, esto bajo las siguientes ecuaciones.

$$I_{nompico} = \sqrt{3} * I_p \quad (38)$$

$$I_{nompico} = \sqrt{3} * 4.92A = 6.96A \quad (38)$$

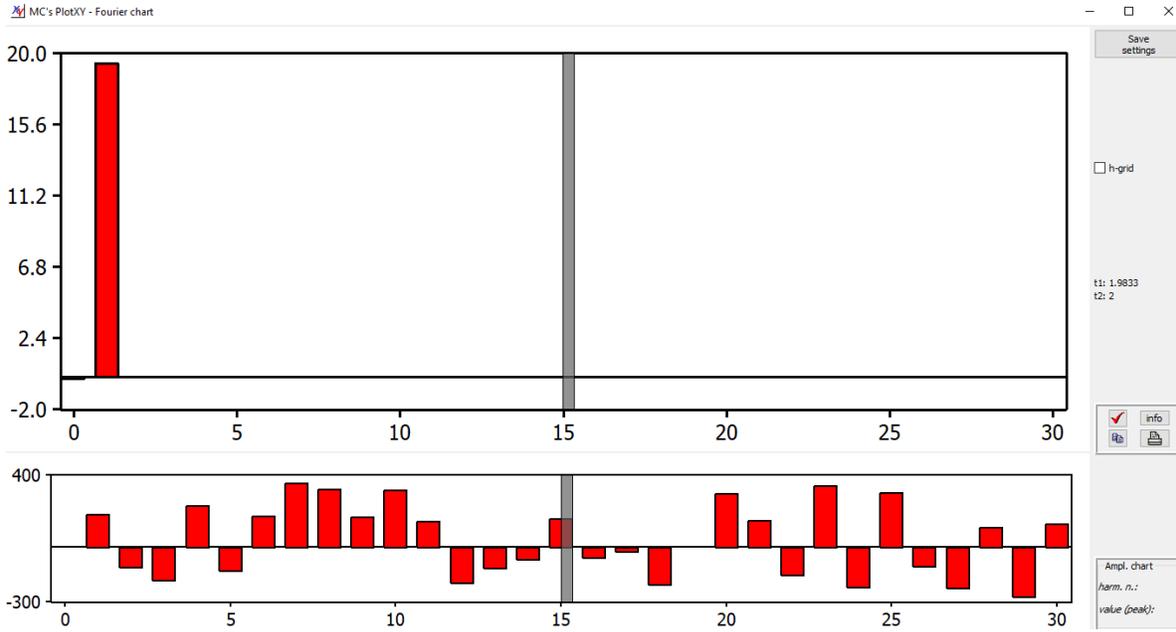


Figura 59. Armónicos de la corriente Inrush con carga al 100% y tiempo de accionamiento de S1 fase 1.

Fuente: Autores

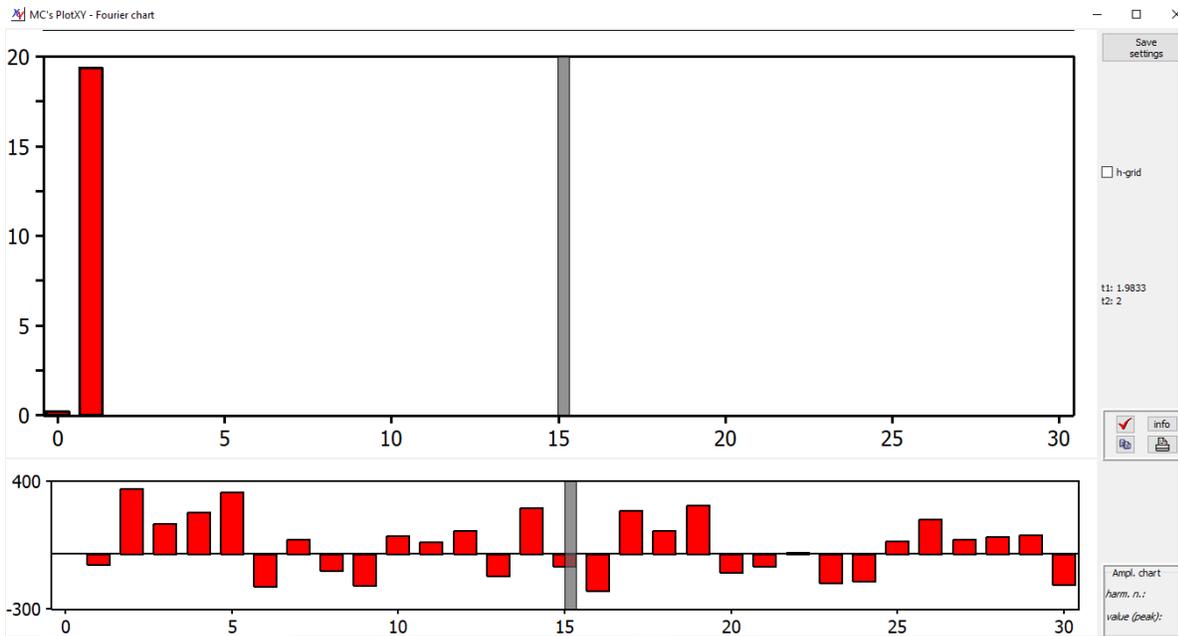


Figura 60. Armónicos de la corriente Inrush con carga al 100% y tiempo de accionamiento de S2 fase 2.

Fuente: Autores

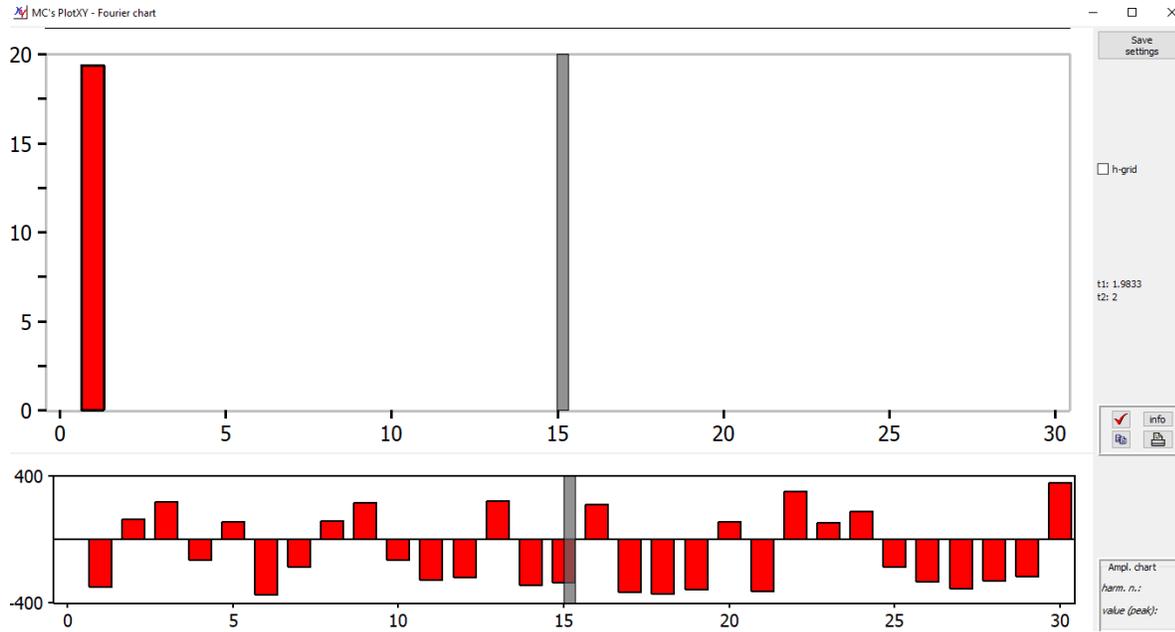


Figura 61. Armónicos de la corriente Inrush con carga al 100% y tiempo de accionamiento de S1 fase 1.

Fuente: Autores

7. Conclusiones

7.1. Transformador Monofásico 37.5kVA

El análisis inicial del transformador de 37.5kVA revela varios aspectos cruciales. En primer lugar, durante las simulaciones, se destacó que el punto de estabilización de la corriente en vacío ocurrió a los 5.5 segundos después de cerrar el suiche (S1) en el tiempo 0. Este lapso refleja un aumento significativo de la corriente, alcanzando 10 veces la corriente nominal. Este incremento se debe al cierre de S1, el cual ocurre en los cruces por cero del voltaje, equilibrando así la corriente. Cuando S1 cierra en los picos de voltaje, la corriente se estabiliza en su valor mínimo, denotado como $I_{\text{vacío}}$.

La observación de la distorsión sinusoidal es otro hallazgo importante, resultado de la generación de armónicos durante la saturación magnética del núcleo, lo que conlleva a una energización desincronizada.

El transitorio generado por la energización del transformador alcanza su estabilidad en aproximadamente 5.5 segundos, con una corriente final de 251mA (comparada con los 99.2mA de corriente a vacío en la media tensión).

La sincronización del interruptor con los valores pico del voltaje mejora significativamente la estabilidad de la corriente, evitando el desarrollo de sobrecorrientes y generando una señal con menos armónicos y, por ende, menos distorsión.

En cuanto al arranque del transformador con carga completa, la corriente de inrush en vacío coincide con la corriente de inrush al 100% de la carga, demostrando que esta corriente no depende de la carga. Sin embargo, la presencia de carga amortigua la forma de la señal, reduciendo la saturación y los armónicos, lo que resulta en un tiempo de estabilidad significativamente menor, de 0.95 segundos. Esta condición también promueve una forma de onda más senoidal en comparación con el arranque en vacío.

Cuando el transformador arranca sincronizado y con carga, la corriente de arranque se limita a la corriente nominal de la carga, lo que resulta en una señal muy senoidal con una mínima distorsión armónica. No hay picos de arranque, y el transformador arranca con un porcentaje de carga mayor al mínimo (10%), manteniendo un comportamiento similar en la corriente.

El análisis de los armónicos generados en condiciones de vacío revela una distorsión significativa debido a la saturación magnética del núcleo. En contraste, al sincronizar el tiempo de cierre del suiche, se generan menos armónicos y, por ende, menos distorsión en la señal de corriente.

7.2. Transformador Trifásico de 150 kVA

El análisis inicial del transformador de 150kVA revela varios aspectos cruciales. En primer lugar, durante las simulaciones, se destacó que el punto de estabilización de la corriente en vacío ocurrió a los 1.76 segundos después de cerrar el suiche (S1, S2 y S3) en el tiempo 0. Este lapso

refleja un aumento significativo de la corriente, alcanzando 13 veces la corriente nominal. Este incremento se debe al cierre de S1, S2 y S3, el cual ocurre en los cruces por cero del voltaje, equilibrando así la corriente. Cuando S1, S2 y S3 cierra en los picos de voltaje, la corriente se estabiliza en su valor mínimo, denotado como $I_{vacío}$.

La observación de la distorsión sinusoidal es otro hallazgo importante, resultado de la generación de armónicos durante la saturación magnética del núcleo, lo que conlleva a una energización desincronizada.

El transitorio generado por la energización del transformador alcanza su estabilidad en aproximadamente 1.76 segundos, con una corriente final de 1.95A (comparada con los 160mA de corriente a vacío en la media tensión).

La sincronización del interruptor con los valores pico del voltaje mejora significativamente la estabilidad de la corriente, evitando el desarrollo de sobrecorrientes y generando una señal con menos armónicos y, por ende, menos distorsión.

En cuanto al arranque del transformador con carga completa, la corriente de inrush en vacío coincide con la corriente de inrush al 100% de la carga, demostrando que esta corriente no depende de la carga. Sin embargo, la presencia de carga amortigua la forma de la señal, reduciendo la saturación y los armónicos, lo que resulta en un tiempo de estabilidad significativamente menor, de 0.4 segundos. Esta condición también promueve una forma de onda más senoidal en comparación con el arranque en vacío.

Cuando el transformador arranca sincronizado y con carga, la corriente de arranque se limita a la corriente nominal de la carga, lo que resulta en una señal muy senoidal con una mínima distorsión armónica. No hay picos de arranque, y el transformador arranca con un porcentaje de carga mayor al mínimo (10%), manteniendo un comportamiento similar en la corriente.

El análisis de los armónicos generados en condiciones de vacío revela una distorsión significativa debido a la saturación magnética del núcleo. En contraste, al sincronizar el tiempo de cierre de los suiche, se generan menos armónicos y, por ende, menos distorsión en la señal de corriente.

8. Recomendaciones

Refinamiento de la sincronización del interruptor, dado que la sincronización del interruptor con los picos de voltaje ha demostrado mejorar la estabilidad de la corriente y reducir la distorsión armónica, se recomienda ajustar los parámetros de sincronización para optimizar aún más este proceso. Explorar diferentes estrategias de sincronización y evaluar su impacto en la calidad de la señal podría ser beneficioso.

Consideración de la carga durante la simulación, dado que la presencia de carga afecta significativamente la forma de la señal de corriente durante el arranque del transformador, se sugiere incorporar variaciones en la carga en las simulaciones para obtener resultados más representativos de las condiciones reales de operación. Esto podría implicar la simulación de diferentes niveles de carga y su impacto en la corriente de arranque y la estabilidad transitoria.

Análisis detallado de los armónicos, dado que la presencia de armónicos en la señal de corriente está asociada con la saturación magnética del núcleo del transformador, se recomienda realizar un análisis más detallado de la generación de armónicos y su impacto en el rendimiento del transformador. Esto podría incluir la evaluación de técnicas de mitigación de armónicos y la optimización del diseño del transformador para reducir la distorsión armónica.

Validación experimental, para validar los resultados de las simulaciones y garantizar su precisión, se recomienda realizar pruebas experimentales utilizando equipos reales. Estas pruebas podrían incluir la medición de corrientes y voltajes durante el arranque del transformador bajo

diferentes condiciones de carga y sincronización del interruptor. La comparación de los datos experimentales con los resultados de las simulaciones ayudaría a verificar la validez del modelo y a identificar posibles áreas de mejora.

Optimización de parámetros del modelo lo que es importante revisar y ajustar los parámetros del modelo utilizado en las simulaciones para garantizar su precisión y representatividad. Esto podría incluir la calibración de los parámetros del transformador, la fuente de alimentación y otros componentes del circuito para que se ajusten mejor a las características reales del sistema.

Al implementar estas recomendaciones, es posible mejorar la precisión y la utilidad de las simulaciones, lo que a su vez puede contribuir a un diseño más eficiente y confiable de sistemas de energía eléctrica.

9. Referencias bibliográficas

Álvarez Pulido, M. (2009). *Transformadores*. Barcelona: MARCOMBO.

Hernández Areu, O. N., Ramos Guardarrama, J., & Perera Escobar, R. (Enero de 2017). *cujae*.

Obtenido de *cujae.edu.cu*: <https://onx.la/78273>

Maldonado , O., & Vera Gavilanez, R. M. (16 de Febrero de 2017). *espol*. Obtenido de

espol.edu.ec: <https://goo.su/4WnX>

Oliveira, M. O., Bretas, A. S., Perrone, O. E., Reversat, J. H., Muñoz, H. E., & Paucar, R. O.

(2012). *academia*. Obtenido de *academia.edu*: <https://onx.la/9d46d>

Pérez Londoño, S. M., & López Quintero, J. G. (2018). *utp*. Obtenido de *utp.edu.co*:

<https://goo.su/ZSp8R35>

Rodas Rendón, D. (Diciembre de 2005). *dialnet.unirioja*. Obtenido de *dialnet.unirioja.es*:

<https://onx.la/e6408>

Vázquez Ojeda, M. E. (2020). *unam*. Obtenido de *unam.mx*: <https://onx.la/30a3d>