



# **REGULADOR FERRORESONANTE COMO EQUIPO ACONDICIONADOR VOLTAJE.**

**Miguel Ángel López Therán**

UNIVERSIDAD DE PAMPLONA

FACULTAD DE INGENIERÍAS Y ARQUITECTURA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA, SISTEMAS Y  
TELECOMUNICACIONES

PROGRAMA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

2017

# Regulador ferroresonante como equipo acondicionador voltaje.

**Miguel Ángel López Therán**

Tesis o trabajo de investigación presentada(o) como requisito parcial para optar al título de:

**Ingeniero Eléctrico.**

Director (a):

Msg. Ingeniería Eléctrica. Luis David Pabón.

Codirector (a):

Ing. Edison Andrés Caicedo.

Línea de Investigación:

Calidad de la energía

Grupo de Investigación:

Sistemas Energéticos

UNIVERSIDAD DE PAMPLONA  
FACULTAD DE INGENIERÍAS Y ARQUITECTURA  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA, SISTEMAS Y  
TELECOMUNICACIONES  
PROGRAMA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA  
2017

## *Dedicatoria*

*Primero que nada, le doy gracias a dios por bendecirme y dame la oportunidad de ser ingeniero. Dedico este gran logro a todas las personas que me ayudaron a culminar mi pregrado.*

*Principalmente mi familia quienes me dieron todo el apoyo económico y moral. Mi madre y mi esposa por su apoyo incondicional a pesar de las adversidades.*

*A mis profesores por darme a conocer todo el conocimiento sobre esta carrera y por todo el apoyo brindado.*

*Agradezco a mis compañeros de la universidad que de cada uno he aprendido algo para crecer como persona y como profesional.*

## **Agradecimientos**

Agradezco a mi director Luis David Pabón, a mi codirector Edison Andrés Caicedo por todo el apoyo brindado en el transcurso de mis estudios de pregrado y también a todos mis profesores Phol Patiño, Samuel, santafe, Victor garrido, Jorge Luis, Aldo pardo, Tania. que a lo largo de desarrollo como profesional me han enseñado a ser cada día mejor persona y mejor profesional.

## **Resumen**

En este proyecto se realizará un estudio del fenómeno de la ferresonancia en los transformadores con el fin de realizar el diseño de un transformador ferresonante como un equipo acondicionador del voltaje y posteriormente implementarlo como un equipo acondicionador del voltaje. Realizando las respectivas investigaciones sobre este fenómeno y posteriormente el diseño, de esta manera llegar a la implementación de la simulación por medio del programa de Matlab Simulink. Posteriormente los cálculos del diseño luego implementación y pruebas. Consecuente al diseño e implementación se validará el funcionamiento del dispositivo siendo que efectivamente se logre la regulación del voltaje hacia la carga mediante el analizador fluke 434, para asegurar que el equipo opere de manera correcta y validar los beneficios obtenidos de esta investigación.

**Palabras clave:**

**Resonante.**

**Ferresonancia.**

**Condensador de resonancia.**

**Curva de magnetización.**

**Saturación.**

# Abstract

In this project, a study of the phenomenon of ferroresonance in transformers will be carried out in order to design a ferroresonant transformer as a voltage conditioning equipment and later implement it as a voltage conditioning equipment. Carrying out the respective investigations on this phenomenon and later the design, in this way arrive at the implementation of the simulation by means of the program of Matlab Simulink. Subsequently the design calculation then implementation and testing. Consistent with the design and implementation, the operation of the device will be validated, in order to effectively regulate the voltage to the load through the fluke 434 analyzer, to ensure that the equipment operates correctly and validate the benefits obtained from this investigation.

## **Keywords:**

**Resonant.**

**Ferroresonance.**

**Resonance capacitor.**

**Magnetization curve**

**Saturation.**

# Contenido

Pág.

1. Marco teórico.....	3
2. Metodología de diseño del transformador ferresonante utilizable como equipo acondicionador del voltaje.....	26
3. Simular el regulador de voltaje basado en un transformador ferresonante...	33
4. Implementar el transformador ferresonante a partir de los cálculos obtenidos. ....	47
5. Validar el acondicionamiento del voltaje realizado por el transformador ferresonante.....	62
6. Conclusiones.....	72
7. Bibliografía .....	73

# Lista de figuras

## Pág.

Figura 1. Solución gráfica de un circuito serie ferresonante. (Eduardo José Toledo). ....	7
Figura 3. versión simplificada de la curva de magnetización. (perfect, 2017). ....	23
Figura 4. Rango típico de eficiencia de hierro versus porcentaje de carga. (perfect., 2017). ....	24
Figura 5. Forma de onda de voltaje primario de un transformador de voltaje constante (MCLYMAN, 3 edition (February 18, 2009)). ....	27
Figura 6. Variación del voltaje de salida, como una función del voltaje de entrada. (MCLYMAN, 3 edition (February 18, 2009)). ....	28
Figura 7. Ciclo de histéresis especificando la zona de saturación. (MCLYMAN, 3 edition (February 18, 2009)). ....	29
Figura 8. común desde el regulador de tensión del transformador ferresonante. ....	33
Figura9.esquemático de un común desde el regulador de tensión del transformador ferresonante.....	34
Figura 10. Fuente de voltaje a 120 v sin la conexión del capacitor. ....	35
Figura 11. Ciclo de histéresis para Fuente de voltaje a 120 v sin la conexión del capacitor. ....	36
Figura 12. Fuente de 120 v y conexión del capacitor de 30 $\mu$ F. ....	37
Figura 13. Ciclo de histéresis para Fuente de voltaje a 120 v con la conexión del capacitor de 30 $\mu$ F. ....	38
Figura 14. Fuente de 120 v y conexión del capacitor de 35 $\mu$ F. ....	39
Figura 15. Ciclo de histéresis para Fuente de voltaje a 120 v con la conexión del capacitor de 35 $\mu$ F. ....	40
Figura 17. Ciclo de histéresis para Fuente de voltaje a 110 v con la conexión del capacitor de 35 $\mu$ F. ....	42
Figura 18. Fuente de 100 v, conexión del capacitor de 35 $\mu$ F. ....	43
Figura 19. Ciclo de histéresis para Fuente de voltaje a 100 v con la conexión del capacitor de 35 $\mu$ F. ....	44
Figura 20. Valores de voltaje y corriente del transformador en vacío. ....	50
Figura 21. Curva de magnetización del transformador a partir de los valores de voltaje y corriente obtenidos. ....	51
Figura 22. Onda de inducción de campo magnético a 120 V. ....	52
Figura 23. Onda de corriente a 120 V. ....	52
Figura 24. Ciclo de histéresis del transformador a 120 V. ....	53
Figura 25. Comparación de las gráficas de tensión en el primario y secundario. ....	56
Figura 26. Tensión en el primario con respecto al secundario.....	57



Figura 27. Esquema de conexión del transformador básico ferroresonante. ....	62
.....	62
Figura 28. Conexión del transformador básico ferroresonante de acuerdo al esquema anterior.....	62
Figura 29. Grafica donde se evidencia la regulación del transformador básico ferroresonante en vacío. Fuente Autor. ....	65
Figura 30. Grafica donde se evidencia la regulación del transformador básico ferroresonante con una carga constante de dos amperios. ....	69
Figura 31. Porcentaje de tolerancia de variación de tensión. Fuente Autor. ....	71

## Lista de tablas

Tabla 1. Resultados de la regulación de voltaje en el secundario con una capacitancia de 160 $\mu$ F. ....	55
Tabla 2. Resultados de la regulación de voltaje en el bobinado secundario a partir de variaciones en el primario en vacío. ....	63
Tabla 3. Resultados de la regulación de voltaje en el bobinado secundario a partir de variaciones en el primario con carga. ....	66

# Introducción

Actualmente en la industria del sector energético la calidad de la energía es uno de los puntos claves donde los operadores de red quieren optimizar disminuyendo las pérdidas en las redes eléctricas y manteniendo un nivel de tensión con la menor variación posible a pesar de la diversidad de problemas que pueden suceder sea por errores humanos o naturales.

La ferresonancia es uno de los fenómenos que afectan la calidad de la energía en los transformadores, esto es debido a inductancias saturables no lineales presentes en el núcleo de los transformadores debido a sus características propias de construcción.

En la presente investigación se realizó un estudio para la implementación de un equipo acondicionador del voltaje a partir de la ferresonancia y la aplicación de este fenómeno que afecta en gran medida la calidad de la energía en los transformadores y utilizarlo como un elemento de calidad de energía regulando el voltaje hacia la carga a pesar de las variaciones producidas en las redes eléctricas.

# 1. Marco teórico

El término "Ferro-resonancia", que apareció en la literatura por primera vez en 1920, se refiere a todos los fenómenos oscilantes que se producen en un circuito eléctrico que debe contener al menos: (FERRACCI, 1998).

- Inductancia no lineal (ferromagnética y saturable).
- Un capacitor.
- Fuente de voltaje (generalmente sinusoidal).
- Bajas pérdidas.

Las redes eléctricas están formadas por un gran número de inductancias saturadas (transformadores de potencia, transformadores inductivos de medida de tensión (VT), reactores shunt), así como condensadores (cables, líneas largas, transformadores de tensión de condensador, Condensadores en los disyuntores, subestaciones metálicas). Por lo tanto, presentan escenarios en los que puede ocurrir ferorrresonancia. (FERRACCI, 1998).

La característica principal de este fenómeno es más de una respuesta estacionaria estable es posible para el mismo conjunto de los parámetros de red. Los transitorios, las sobretensiones eléctricas, los transformadores o las cargas de energización o des energización, la ocurrencia o eliminación de fallos, las obras vivas, etc ... pueden iniciar la ferorrresonancia. La respuesta puede saltar repentinamente de una respuesta normal de estado estacionario (sinusoidal a la misma frecuencia que la fuente) a otra respuesta ferorrresonante en estado estacionario caracterizada por altas sobretensiones y niveles armónicos que pueden provocar daños graves al equipo. (FERRACCI, 1998).

Un ejemplo práctico de este comportamiento (sorprendente para los no iniciados) es la des energización de un transformador de tensión mediante la apertura de un interruptor automático. Dado que el transformador sigue siendo alimentado a través de condensadores de clasificación a través del interruptor, esto puede conducir a cero

tensiones en los terminales del transformador o a Tensión altamente distorsionada permanente de una amplitud bien sobre la tensión normal. (FERRACCI, 1998).

Para evitar las consecuencias de la ferorrresonancia (disparo intempestivo de dispositivos de protección, destrucción de equipos tales como transformadores de potencia o transformadores de tensión, pérdidas de producción, ...), es necesario: (FERRACCI, 1998).

- Comprender el fenómeno.
- Predecirlo.
- Identificarlo.
- Evitarlo o eliminarlo.

Poco se sabe acerca de este complejo fenómeno, ya que es raro y no puede ser analizado o predicho por los métodos de cálculo (basado en la aproximación lineal) normalmente utilizados por los ingenieros eléctricos. Esta falta de conocimiento significa que se considera fácilmente responsable de una serie de destrucciones inexplicables o mal funcionamiento del equipo. (FERRACCI, 1998).

Una distinción entre la resonancia y la ferorrresonancia resaltará las características específicas y a veces desconcertantes de la ferorrresonancia. (FERRACCI, 1998).

Ejemplos prácticos de configuraciones de sistemas de energía eléctrica en riesgo de ferorrresonancia se utilizan para identificar y enfatizar la variedad de configuraciones potencialmente peligrosas. Los diseñadores de sistemas bien informados evitan ponerse en situaciones de riesgo. (FERRACCI, 1998).

Un estudio predictivo debería ser realizado por especialistas si persisten dudas sobre configuraciones límite e inevitables. Las herramientas apropiadas de análisis numérico permiten la predicción y evaluación del riesgo de ferorrresonancia en un sistema de potencia para todos los valores posibles de los parámetros de este sistema en condiciones normales y degradadas. Existen soluciones prácticas para prevenir o proporcionar protección contra la ferorrresonancia. (FERRACCI, 1998).

Las capacitancias e inductancias de un Sistema Eléctrico de Potencia pueden constituir circuitos resonantes en función de características particulares de operación. diferencia de circuitos lineales, donde existe un solo punto de resonancia, en los circuitos

no lineales el fenómeno de ferresonancia puede aparecer en distintos puntos de trabajo. Debido a esto, es necesario que los sistemas eléctricos sean proyectados de manera adecuada, a modo de evitar que este fenómeno ocurra. La ferresonancia puede provocar que las corrientes y las tensiones superen ampliamente las magnitudes nominales de los aparatos que componen el SEP causando daños que podrían ser permanentes. Además de estos efectos, la ferresonancia produce ruido y calentamiento excesivo en transformadores, formas de onda extremadamente irregulares de tensión y corriente, quema de pararrayos y daños en cables y capacitores. En este sentido, algunos fenómenos pueden ayudar a identificar una situación de ferresonancia, como, por ejemplo: sobretensiones y sobre corrientes, elevados niveles de distorsión, ruido elevado en equipamientos, operación incorrecta de dispositivos de protección, calentamiento excesivo de componentes, daños en equipos eléctricos, aislamientos dañados y parpadeos de tensión (flickers). (Eduardo José Toledo).

La ferresonancia puede aparecer en la conexión de elementos inductivos y capacitivos conectados en serie o paralelo, siendo los valores máximos de las sobre corrientes y sobretensiones limitados únicamente por la resistencia del sistema. La existencia de elementos no lineales, como transformadores, facilita la ocurrencia de este fenómeno debido a que la saturación de su núcleo hace que exista más de un punto de resonancia para un determinado valor de capacitancia. (Eduardo José Toledo).

La ferresonancia es un fenómeno ampliamente estudiado en sistemas eléctrico de potencia que involucra capacitores, inductores saturables y bajas pérdidas. Es muy común que ocurra en Sistemas de Distribución debido a la presencia permanente de impedancia saturable de transformadores y capacitancia en las líneas. (Eduardo José Toledo).

La ferresonancia es un fenómeno usualmente caracterizado por sobretensiones e/o sobre corrientes con formas de onda irregulares el cual está relacionado con la excitación de una o más inductancias saturables a través de una capacitancia en serie. (Eduardo José Toledo).

En un circuito lineal resonante, las reactancias inductivas y capacitivas son de igual magnitud. En esta situación, la única oposición a la corriente es la resistencia del circuito, dando lugar a sobretensiones y sobre corrientes no deseables en la frecuencia de resonancia. Esta resonancia presenta un estado de operación estable y puede ser mitigada por medio de un sistema de control de frecuencia o por la introducción de una resistencia pura en el circuito. (Eduardo José Toledo).

Por otro lado, la ferresonancia es una situación de resonancia con inductancia no lineal, donde la reactancia inductiva no solamente depende de la frecuencia, sino también de la densidad de flujo magnético en el núcleo de hierro del transformador. La inductancia no lineal del núcleo de hierro está representada por la curva de saturación del mismo.

Teóricamente podríamos representar esta inductancia no lineal por dos reactancias inductivas, una reactancia antes (zona lineal) y otra después de la saturación (zona de saturación) del transformador las cuales son definidas como: (Eduardo José Toledo).

- zona lineal:  $X_L\text{-linear} = \omega L \text{ linear}$ .
- zona de saturación:  $X_L\text{-sat} = \omega L \text{ sat}$ .

La ferresonancia puede darse para una configuración serie o una configuración paralela de las capacitancias e inductancias saturables. La Figura 1 muestra la solución gráfica de un circuito serie ferresonante donde los puntos de operación se obtienen de la intersección de  $V_L$  y  $E+V_C$  donde  $V_L$  es la tensión en la inductancia,  $E$  es la tensión de la fuente y  $V_C$  la tensión en la capacitancia respectivamente. (Eduardo José Toledo).

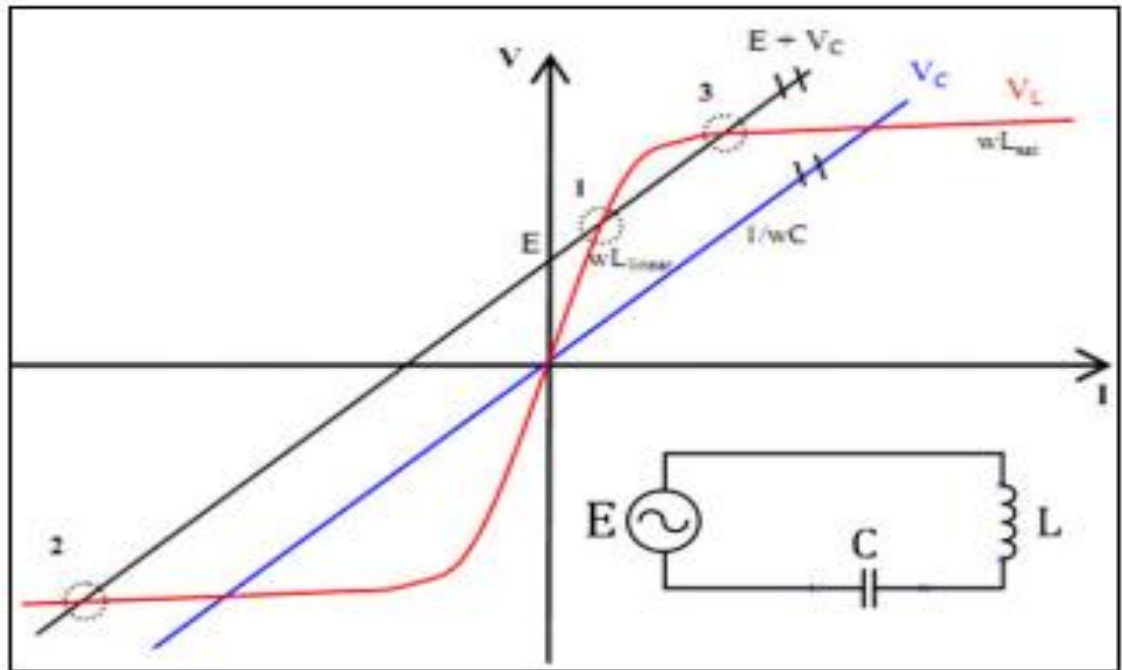


Figura 1. Solución gráfica de un circuito serie ferresonante. (Eduardo José Toledo).  
 Como muestra la Figura 1, podemos ver que existen tres puntos de operación:

- Punto de operación N° 1: corresponde a un estado estable de funcionamiento, es decir, sin ferresonancia. (Situación Inductiva:  $\omega L > X_C$ ). (Eduardo José Toledo).
- Punto de operación N° 2: corresponde a un punto de ferresonancia de estado estable. (Situación capacitiva: Saturación  $< X_C$ ). (Eduardo José Toledo).
- Punto de operación N° 3: este es un punto de funcionamiento inestable. (Eduardo José Toledo).

El punto de operación final dependerá de las condiciones iniciales (flujo residual, valor de capacitancia, tensión de la fuente, punto de conmutación). Por lo tanto, bajo ciertas condiciones iniciales, como por ejemplo sobretensiones transitorias, puede aparecer el fenómeno de ferresonancia el cual puede hacer que las corrientes y tensiones tomen valores muy por encima de sus valores nominales. Este fenómeno permanecerá hasta que la fuente de tensión no sea capaz de suministrar la energía necesaria para mantener este estado. (Eduardo José Toledo).



A su vez, también dependiendo de las configuraciones del circuito, la ferresonancia puede aparecer bajo diferentes modos de operación, como ser: (Eduardo José Toledo).

- Modo Estable: las señales de tensión y corriente son distorsionadas, pero son periódicas con un período igual al de la fuente de alimentación. En este modo de operación el espectro de frecuencia se compone de la frecuencia fundamental y sus armónicos. (Eduardo José Toledo).

- Modo Sub-armónico: las señales son periódicas pero el período es un múltiplo entero del período de la fuente de alimentación. (Eduardo José Toledo).

- Modo Cuasi-periódico: en este modo las señales no son periódicas. (Eduardo José Toledo).

- Modo Caótico: operación donde las señales muestran un comportamiento irregular e impredecible. (Eduardo José Toledo).

Ferresonancia es una oscilación de una carga atrapada en un circuito que contiene condensador e inductor no lineal. Esta oscilación se caracteriza por formas de onda de tensión y corriente altamente distorsionadas. (Sergio R. Sagardia, 1997).

El inductor no lineal normalmente funciona como un dispositivo lineal, pero se fuerza para operar fuera de su rango lineal normal bajo ferresonancia. La no lineal es generalmente debido a la saturación de hierro, de ahí el nombre ferresonancia. (Sergio R. Sagardia, 1997).

El inductor no lineal es usualmente un transformador de potencial magnético usado para medir o proteger, o un transformador o autotransformador de cualquier tamaño o voltaje. El condensador puede estar asociado con conductores de línea de transmisión, cables, capacidades de clasificación de disyuntores. (Sergio R. Sagardia, 1997).

Los efectos de ferorrresonancia varían en su gravedad de aquellos que son inofensivamente débiles a los que son lo suficientemente fuertes como para dañar el equipo. (Sergio R. Sagardia, 1997).

La ferorrresonancia es uno de los fenómenos más complejos en el campo de los transitorios electromagnéticos. Debido a no linealidades, la simulación del dominio del tiempo parece ser el único enfoque confiable para predecir la gravedad de una ferorrresonancia y para verificar la efectividad de las contramedidas. (Sergio R. Sagardia, 1997).

Cómo comienza la ferorrresonancia. (Sergio R. Sagardia, 1997).

La ferorrresonancia comienza como una oscilación ferromagnética que se activa cuando un transformador es impulsado a saturación, en muchos casos como resultado de la desenergización de un conductor de tal manera que una sección de la misma permanece conectada a un transformador. (Sergio R. Sagardia, 1997).

La ferorrresonancia sostenida de un transformador requiere una transferencia continua de potencia de uno o más conductores energizados que permanecen conectados al transformador. (Sergio R. Sagardia, 1997).

Debemos primero darnos cuenta de que cualquier dispositivo de interrupción en su lugar generalmente deja una carga atrapada en la sección de la línea que permanece conectada al transformador. Esta carga atrapada resulta del hecho de que la interrupción de corriente ocurre cuando la corriente se convierte en cero, después de que los contactos se abren. En el instante de la interrupción el voltaje en el conductor alcanza su pico (puesto que la corriente de línea y la tensión en una línea descargada están casi 90 grados fuera de fase.) Por lo tanto, el voltaje asociado con la carga atrapada es casi igual al valor pico de la línea a Tierra. (Sergio R. Sagardia, 1997).

La carga atrapada tiene una trayectoria a tierra a través del devanado del transformador. La corriente de descarga aumentará con el tiempo y eventualmente saturará el núcleo si el conductor es lo suficientemente largo como para atrapar suficiente carga. (Sergio R. Sagardia, 1997).

El núcleo del transformador suele estar diseñado para aproximarse, pero no alcanzar la saturación al final de cada medio ciclo de la tensión nominal. Ya que el voltaje permanece a casi su valor máximo alcanzado. Cuando esto sucede, la reactancia presentada por el transformador cambia de su magnetización a su valor de fuga, que es varios órdenes de magnitud menor. La baja reactividad del transformador saturado proporciona la carga atrapada con una trayectoria fácil a tierra. Si no hay pérdidas, la carga atrapada y por lo tanto la tensión de línea a tierra oscilará. (Sergio R. Sagardia, 1997).

La oscilación del voltaje de la línea resulta del hecho de que la corriente de descarga que fluye a través del transformador saturado llega a cero, en este instante la energía inicialmente almacenada en la capacitancia del circuito se almacena ahora en la inductancia del circuito. La corriente continuará fluyendo y el voltaje de línea aumentará con la polaridad opuesta, hasta que toda la energía se almacene otra vez en la capacitancia de la línea. En ausencia de pérdidas, la tensión de línea negativa alcanzará el mismo valor de pico con el que comenzó y el proceso se repetiría indefinidamente. (Sergio R. Sagardia, 1997).

En la práctica, debido a las pérdidas en la línea y especialmente en el transformador, el voltaje máximo disminuirá con el tiempo. (Sergio R. Sagardia, 1997).

La menor tensión aplicada al devanado del transformador después de cada inversión, da como resultado un periodo de tiempo más largo tomado por el núcleo del transformador para alcanzar la saturación. Por lo tanto, la frecuencia ferresonante disminuye gradualmente. la corriente máxima alcanzada por la descarga del atrapado a través del devanado también disminuye hasta que llega a ser demasiado pequeña para saturar el núcleo del transformador y la oscilación ferromagnética se detiene. (Sergio R. Sagardia, 1997).

Cómo la ferresonancia se mantiene sostenida. (Sergio R. Sagardia, 1997).

se debe suministrar continuamente energía suficiente para compensar las pérdidas asociadas con la ferresonancia. Que la potencia puede ser proporcionada por otras fases del mismo circuito al que está conectado el transformador o por fases de otros

circuitos; En cualquier caso, esas fases deben estar energizadas y acoplarse capacitivamente al conductor con alimentación de corriente conectado al transformador ferorrresonantes. (Sergio R. Sagardia, 1997).

Como ya se ha descrito, la frecuencia de las oscilaciones ferromagnéticas disminuye con el tiempo debido a las pérdidas. Si la frecuencia inicial es igual o mayor que la frecuencia del sistema, entonces existe la posibilidad de que la frecuencia de las oscilaciones se bloquee a la frecuencia de potencia. De esta manera la oscilación ferromagnética se convierte en ferroresonancia. Si, por otro lado, la frecuencia ferromagnética inicial es menor que la frecuencia de potencia, entonces existe la posibilidad de que las oscilaciones ferromagnéticas se enclaven en una subarmónica impar de la frecuencia del sistema. (Sergio R. Sagardia, 1997).

Frecuencias ferorrresonantes superiores están generalmente asociadas con voltajes de pico más grandes. Las ondas de tensión ferorrresonantes con un pico más alto que el voltaje de pico del sistema normalmente tienen la frecuencia de potencia o son caóticas. Las formas de ondas ferorrresonantes subarmónicas tienen generalmente picos más bajos que el del sistema. (Sergio R. Sagardia, 1997).

Cómo se pronosticar la ferorrresonancia. (Sergio R. Sagardia, 1997).

Los conceptos descritos anteriormente son útiles cuando se trata de decidir si una ferorrresonancia sostenida podría ocurrir en una configuración dada. (Sergio R. Sagardia, 1997)

Una vez que se haya establecido la posibilidad de ferorrresonancia de decidir si realmente ocurrirá la ferorrresonancia, y si lo hace la severidad de sus efectos, se requiere resolver un complejo problema no lineal. La simulación del dominio del tiempo parece ser la única herramienta confiable para resolver este problema y para evaluar la efectividad de las contramedidas. (Sergio R. Sagardia, 1997).

El programa informático más utilizado para simular transitorios del sistema eléctrico en general y la ferorrresonancia en particular es el programa electromagnético transitorio

(EMTP). Todos los componentes relevantes deben ser modelados en detalle, incluyendo las líneas de transmisión (considerando la longitud de la línea, la geometría de la torre, el tamaño del conductor), cables, transformadores (incluyendo histéresis y pérdidas de núcleo) En la que se abren las fases también son importantes). (Sergio R. Sagardia, 1997).

La ferresonancia es un fenómeno de muy alta complejidad y la predicción de su comportamiento depende de muchos factores de difícil estimación. Por este motivo, a pesar de que este fenómeno ha sido extensamente analizado desde hace alrededor de 90 años, aún continúan presentándose fallas catastróficas de equipos como consecuencia de sus efectos destructivos. (Torres, 2017).

El fenómeno de ferresonancia es un problema que en la actualidad se presenta más comúnmente, debido a las características de los transformadores de hoy en día que se diseñan con menores pérdidas, núcleos amorfos, etc. Esto ocasiona que la impedancia no lineal del transformador sea más propensa a producir ferresonancia con alguna reactancia capacitiva, como la de los cables, bancos de capacitores, o elementos del sistema que presenten una carga capacitiva. (Torres, 2017).

Los daños resultantes del fenómeno de ferresonancia pueden ser catastróficos en el sistema, ya que se producen sobretensiones de larga duración. Esto puede ocasionar que exploten apartarrayos y haya daños en transformadores, líneas, cables y equipos que se encuentren conectados cerca donde ocurre este problema. (Torres, 2017).

la ferresonancia está comúnmente ligada a fenómenos oscilatorios que involucran a un inductor no lineal, un capacitor, y una fuente de voltaje, resultando en sobretensiones y sobre corrientes altamente distorsionados. El primer paso para entender el fenómeno de ferresonancia es familiarizarse con el concepto de resonancia, el cual puede ser explicado usando un circuito simple RLC como se muestran en la Figura 2. (Torres, 2017).

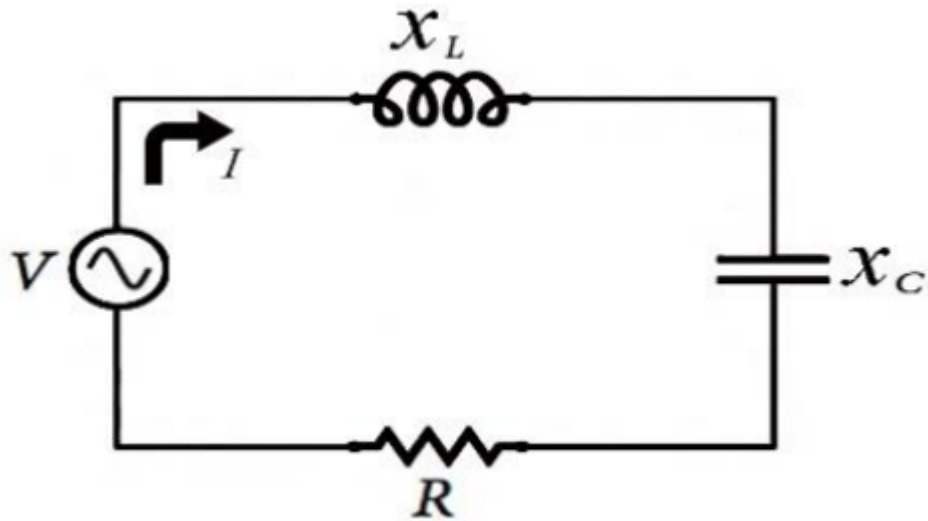


figura 2. Circuito RLC. (Torres, 2017).

El circuito de la Figura 2 es resonante a cierta frecuencia cuando la reactancia inductiva ( $X_L$ ) y capacitiva ( $X_C$ ) se cancelan una a otra. Estos valores de impedancia son predecibles y cambian con las variaciones de frecuencia. (Torres, 2017).

Lo primero que debe tenerse en cuenta sobre la ferorresonancia es que es un comportamiento no lineal. En general, los ingenieros pueden trabajar a menudo alrededor de no linealidades usando una aproximación lineal simplificada para calcular o predecir el desempeño dentro del rango de operación "normal". Esto no es posible en el caso de la ferorresonancia ya que nuestros cálculos linealizados no lo predicen. Afortunadamente podemos tratar de forma más directa y exitosa gracias a las herramientas de simulación por ordenador como EMTP (el Programa de Transitorios Electromagnéticos) (Bruce A. Mork).

La resonancia con transformadores se informó por primera vez en 1907 y la palabra ferorresonancia se acuñó en 1920. La ferorresonancia es posible en un circuito serie L-C donde el L es un inductor ferro-magnético (hierro saturable) y C es alguna forma de capacitancia. Ferorresonancia se convirtió en un problema conocido en los años 1930 cuando los condensadores de la serie se estaban utilizando para mejorar la regulación del voltaje en sistemas de distribución. Muchos otros escenarios son posibles y veremos varios ejemplos más adelante en este artículo. (Bruce A. Mork).

Ferroresonancia ha sido tradicionalmente considerado como un "fenómeno" debido a su imprevisibilidad, nuestra falta de comprensión general, y nuestra incapacidad para analizar con precisión su comportamiento. Sin embargo, esto cambió a finales de 1970 cuando se hicieron importantes avances en la dinámica no lineal y la teoría del caos. Y finalmente, a finales de la década de 1980, comenzaron a publicarse algunas referencias útiles de ingeniería que podrían aplicarse a la ferrosresonancia. Hoy en día se sabe ampliamente que la no linealidad es la regla y no la excepción. Ferroresonancia es sólo otro de muchos comportamientos no lineales en el mundo que nos rodea. Otros ejemplos son pronóstico climático, ritmos cardíacos (arritmias), mercados de valores y la economía, pronóstico de la población y epidemiología. Como ingenieros, los ejemplos que encontramos pueden ser estructuras como puentes y edificios, conductores galopantes, o flujo de carga, colapso de voltaje, dispositivos electrónicos y sistemas de control de retroalimentación. (Bruce A. Mork).

Si la ferrosresonancia se produce o no depende del valor de la capacitancia CS y de la curva de saturación del núcleo del transformador representado por LM. La no linealidad involucrada hace que sea imposible predecir si la ferrosresonancia ocurrirá o no, y si es así, cuán severa será la sobretensión. Más de un modo de ferrosresonancia es posible, y la operación puede saltar dentro y fuera de la ferrosresonancia dependiendo del ángulo de conmutación. En general, los criterios básicos que hacen posible la ferrosresonancia son los siguientes:

- Una capacitancia en serie con la inductancia de magnetización del núcleo.
- Transformador descargado o ligeramente cargado (regla muy aproximada: inferior a 10-20% de carga nominal).
- Procedimientos de conmutación unipolar o dispositivos de interrupción En un sistema trifásico. (Bruce A. Mork).

Pueden estar involucrados transformadores de cualquier tipo y tamaño. Los casos más comunes son transformadores de potencia monofásicos y transformadores de voltaje energizados a través de una capacitancia en serie, y transformadores de distribución trifásica sujetos a conmutación o interrupción unipolar. También podrían ser posibles reactores de derivación con un núcleo saturable. Los transformadores de potencia conmutados con disyuntores tripulados trifásicos son candidatos poco probables. Capacitancia puede ser en forma de bancos de condensadores reales, o como acoplamiento capacitivo. Los "bancos de tapas" reales son fáciles de visualizar, pero los efectos de acoplamiento capacitivo pueden ser más difíciles de identificar. (Bruce A. Mork).

- Condensador de serie para compensación de línea.
- Bancos de condensadores de derivación.
- Cable subterráneo.
- Acoplamiento capacitivo, línea de doble circuito
- Sistemas conectados a tierra únicamente a través de capacitancia parasita.
- Clasificación de condensadores en los disyuntores.
- Condensadores de sobretensión del generador.
- Acoplamiento capacitivo interno al transformador. (Bruce A. Mork).

Algunas definiciones del transformador ferroresonante.

Entrehierro: El espacio entre el shunt magnético y el núcleo, usado para establecer la reluctancia requerida de la trayectoria del flujo de derivación. (IEEE, IEEE Std 449™ - 1998 (R2007)).

Ferroresonancia: El modo de funcionamiento en estado estacionario que existe cuando una tensión alterna de magnitud suficiente se aplica a un circuito que consiste en



capacitancia e inductancia ferromagnética que provocan cambios en la inductancia ferromagnética que se repiten cada medio ciclo. (IEEE, IEEE Std 449™-1998 (R2007)).

Regulación del voltaje ferroresonante: El efecto obtenido por la acción limitadora de la característica de saturación del material magnético en un circuito ferroresonante, que regula la tensión de salida sobre un intervalo especificado de tensiones de entrada y una frecuencia especificada de excitación. (IEEE, IEEE Std 449™-1998 (R2007)).

Transformador ferroresonante del regulador de voltaje: Un transformador de alta reactancia que emplea derivaciones magnéticas que permiten combinar las funciones magnéticas de los circuitos reguladores ferroresonantes paralelos en serie en un único componente magnético. (IEEE, IEEE Std 449™-1998 (R2007)).

Resonancia de saltos: Un fenómeno asociado a los reguladores ferroresonante, en los que el voltaje de salida cambia repentinamente al modo de operación de regulación a algún valor de la tensión de entrada ascendente (véase Figura 6 y Figura 7) o cae repentinamente del modo de operación de regulación con voltaje de entrada descendente. (IEEE, IEEE Std 449™-1998 (R2007)).

Shunt magnético: La sección del núcleo del transformador ferroresonante que proporciona el camino principal para el flujo generado por la corriente de bobinado primario que no enlaza el devanado secundario. Además, las derivaciones proporcionan una trayectoria principal para el flujo resultante de la salida y las corrientes de devanado resonantes que no unen el devanado primario. (IEEE, IEEE Std 449™-1998 (R2007)).

Voltaje de salida en función de las características del voltaje de entrada: Los reguladores de Ferroresonante pueden tener características de la salida contra la entrada. (IEEE, IEEE Std 449™-1998 (R2007)).

Característica de sobrecarga: Esa parte de la corriente de salida frente a la corriente de salida característica de los reguladores ferroresonantes de la corriente nominal a la corriente de cortocircuito. (IEEE, IEEE Std 449™-1998 (R2007)).

Sección primaria del núcleo: La sección del núcleo de un transformador ferresonante en el que se enrolla el devanado primario. (IEEE, IEEE Std 449™-1998 (R2007)).

Devanado primario: El devanado del transformador ferresonante al cual se aplica la tensión de entrada. (IEEE, IEEE Std 449™-1998 (R2007)).

Potencia nominal de entrada: La potencia de entrada al regulador ferresonante con la carga nominal y bajo las condiciones de funcionamiento indicadas. (IEEE, IEEE Std 449™-1998 (R2007)).

Voltamperios nominales de entrada: Los voltamperios de entrada al regulador ferresonante con la carga nominal y bajo las condiciones de funcionamiento indicadas. (IEEE, IEEE Std 449™-1998 (R2007)).

Voltamperios de salida nominal del regulador ferresonante: La suma de los voltamperios nominales de la bobina de salida en las condiciones de funcionamiento indicadas. (IEEE, IEEE Std 449™-1998 (R2007)).

Voltamperios nominales de la bobina de salida: El producto de la tensión de salida y de la corriente de salida (valores cuadrados radiales) a la carga nominal y bajo las condiciones de funcionamiento indicadas. (IEEE, IEEE Std 449™-1998 (R2007)).

Condensador de resonancia: Proporciona la capacitancia asociada con los circuitos de regulación ferresonantes con el fin de producir ferresonancia. (IEEE, IEEE Std 449™-1998 (R2007)).

Condensadores de resonancia voltamperios: El producto de la tensión a través del condensador resonante y la corriente a través del condensador resonante (valores medios cuadrados) en las condiciones de funcionamiento indicadas. (IEEE, IEEE Std 449™-1998 (R2007)).

Resonante: El devanado del transformador ferroresonante utilizado para conectar la capacitancia resonante al circuito. (IEEE, IEEE Std 449™-1998 (R2007)).

Punto de inversión: Ese punto de la corriente de entrada frente a las características de voltaje de entrada donde la corriente de entrada alcanza un valor mínimo y comienza a aumentar. (IEEE, IEEE Std 449™-1998 (R2007)).

Sección secundaria del núcleo: La sección del transformador ferroresonante en la que se bobinan los devanados de salida y de resonancia. En el funcionamiento en estado estacionario, esta sección del núcleo es normalmente conducida a saturación magnética. (IEEE, IEEE Std 449™-1998 (R2007)).

Voltaje de entrada de cortocircuito: El producto de la tensión de entrada y la corriente de entrada (valores rms) con el devanado resonante en cortocircuito. (IEEE, IEEE Std 449™-1998 (R2007)).

Los transformadores Ferrorresonantes están diseñados para lograr una regulación con funcionamiento no lineal. Proporcionan regulación de línea, reducen armónicos y limitan la corriente. (INC, 2017).

Un transformador convencional tiene una relación de vueltas entre los devanados primario y secundario, que están acoplados magnéticamente sobre un núcleo común. Cuando se aplica una tensión a través de un devanado primario, una corriente de magnetización establece el flujo primario en el núcleo. El flujo primario enlaza el secundario e induce un voltaje en los devanados secundarios proporcional a la relación de espiras. Cuando una carga está conectada a través del devanado secundario, la corriente secundaria produce un flujo secundario que tiende a cancelar el flujo primario. La corriente primaria aumenta para mantener el nivel de flujo original. (INC, 2017).

Los transformadores convencionales están diseñados para operar en la parte lineal de la curva de magnetización, por debajo de la "rodilla". (INC, 2017).

No existe un método para la regulación de la salida contra el cambio de las tensiones de entrada en un transformador convencional. (INC, 2017).

Un transformador ferroresonante básico consiste en un núcleo, un devanado primario, dos devanados secundarios (uno para la carga y otro para el condensador) y un derivador magnético que separa los devanados primario y secundario. (INC, 2017).

Cuando se aplica una tensión al devanado primario, la tensión secundaria aumenta a medida que aumenta el voltaje primario. A medida que aumenta el voltaje primario, el voltaje secundario continúa aumentando hasta un punto de discontinuidad, o resonancia secundaria, donde se produce un aumento abrupto, aproximadamente 20%, en la tensión secundaria. El efecto de resonancia aumenta inmediatamente la densidad de flujo secundario y causa la saturación de esa porción del núcleo. Esta saturación parcial del núcleo es la clave del diseño magnético del Transformador Ferroresonante. (INC, 2017).

El voltaje inducido en el devanado del condensador por el flujo primario hace que fluya una corriente capacitiva. El flujo debido a esta corriente está en fase con el flujo primario. Esta adición de flujo se produce en la porción secundaria del núcleo. El flujo aumentado satura la porción del núcleo en el devanado secundario solamente. La porción primaria del núcleo está funcionando por debajo de la saturación o por debajo de la "rodilla" de la curva de magnetización. (INC, 2017).

La derivación magnética proporciona una trayectoria para el flujo desequilibrado del primario y secundario permitiendo que una porción del flujo primario vuelva al devanado primario sin acoplar el secundario. Al mismo tiempo, permite que el flujo secundario vuelva al devanado secundario sin acoplar el primario. (INC, 2017).

Un cambio en el voltaje de entrada hace que la corriente de magnetización cambie y produce un cambio de flujo proporcional. Debido al condensador ya la derivación magnética, el circuito magnético secundario está funcionando por encima de la "rodilla" en la parte plana de la curva de magnetización, y el cambio de flujo de salida se reduce. Esto permite que la tensión de salida sea muy insensible a los cambios de la entrada. Normalmente se alcanza una atenuación de 10 a 1 o aproximadamente 1% para un cambio del 10% en la entrada. (INC, 2017).

La regulación de carga será mayor debido a la regulación interna inherente del transformador. (INC, 2017).

Los transformadores Ferroresonantes son inherentemente auto protegidos contra cortocircuitos y son capaces de suministrar grandes corrientes de sobretensión si es necesario debido a la gran cantidad de energía almacenada en el circuito secundario. (INC, 2017).

Las desventajas de un Transformador Ferroresonante son: (INC, 2017).

- Frecuencia sensible. (INC, 2017).
- Temperatura sensible. (INC, 2017).
- El campo magnético externo puede requerir blindaje para componentes sensibles. (INC, 2017).

Regulador Ferroresonante. (BV, 2017).

Los reguladores Ferroresonantes, también conocidos como Reguladores de Tensión Constante, se basan en una técnica en la que los devanados primario y secundario del transformador están físicamente aislados entre sí por un núcleo de acero (shunt) que reduce significativamente el acoplamiento capacitivo de espigas y Ruido al devanado secundario. (BV, 2017).

Un condensador de CA (Corriente alterna) está conectado al devanado resonante (secundario) del transformador que forma un circuito de tanque (la energía se almacena en el condensador y en el circuito magnético, el circuito magnético se satura cada ciclo). Esto proporciona la función de circuito resonante que contribuye a la regulación de tensión de la alimentación. (BV, 2017).

Como la energía almacenada es más de la que se entrega a la carga, se logra un rendimiento de retención en caso de una interrupción de la tensión de línea. Esto hace que los reguladores Ferroresonantes sean capaces de suprimir transitorios en el bobinado primario a un grado muy alto. Los transitorios causados por el arranque de máquinas o

equipos potentes serán suprimidos y no afectarán la corriente de salida. No es raro encontrar picos de voltaje de hasta 3000V en la primaria en tales circunstancias. (BV, 2017).

En el caso de la salida de corriente alterna la onda de tensión tendrá una forma de seno. (BV, 2017).

Los reguladores resonantes de ferorresonantes son capaces de proporcionar una tensión de salida media casi constante, incluso cuando existe una tensión de entrada muy variable. Pueden funcionar con un rango de voltaje de entrada tan bajo como  $\pm 40\%$  (dependiendo de la carga) o más de la tensión nominal. El factor de potencia de salida permanece en el rango de 0.96 o más de la mitad a la carga completa. (BV, 2017).

Los sistemas de Ferroresonancia ofrecen una fiabilidad excepcional en condiciones extremas de operación y los desprendimientos son muy raros. Los sistemas son completamente no afectados por otros sistemas eléctricos circundantes. (BV, 2017).

Esta estricta regulación y su fiabilidad son ventajosas para las sucursales como la televisión por cable, el generador de esparcidos, la industria del gas y la industria pesada, ya que los dispositivos activos están protegidos de peligrosas fluctuaciones de voltaje. Otra característica única del transformador ferroresonante es su capacidad para proporcionar limitación de corriente en el caso de un cortocircuito. Este efecto se llama foldback. Los sistemas Ferroresonantes son buenos supresores de sobretensión y proporcionan una protección inherente contra los cortocircuitos y no son sensibles a sobrecargas de entrada (como en caso de rayos) que están afectando la tensión de entrada. La corriente de salida del transformador puede alcanzar típicamente el 150% de la corriente de salida de la placa de características durante un corto período de tiempo sin dañar el transformador. (BV, 2017).

Cuando el transformador alcanza el punto de saturación, la corriente de salida disminuirá (se repliega sobre sí misma) hasta un valor mínimo, y por lo tanto proporcionará limitación de corriente. (BV, 2017).

Los diseños basados en un transformador ferroresonante son extremadamente robustos y confiables, y ofrecen muchos años de funcionamiento sin problemas. Las fuentes de alimentación son extremadamente eficientes y tienen un rendimiento típico de > 90% a plena carga. (BV, 2017).

El transformador ferroresonante o transformador de voltaje constante tiene una historia muy larga que fue inventada en 1938 por Joseph Sola y que sigue vendiendo decenas de miles de unidades por año. El ferroresonante de hoy ha tenido algunas mejoras menores, pero permanece fundamentalmente sin cambios desde el diseño original. (perfec, 2017).

Bien conocido por su longevidad, algunos CVT (transformadores de voltaje constante) se encuentran todavía en servicio después de más de 40 años. Limitado a aplicaciones monofásicas, la ferroresonancia se desplaza lentamente por pequeños reguladores electrónicos de voltaje. (perfec, 2017).

La CVT (transformadores de voltaje constante, ferroresonante) utiliza el principio único de la ferroresonancia: funcionamiento de un transformador en la región de saturación magnética. Cuando el núcleo de hierro de un transformador está en saturación, cambios relativamente grandes en la corriente de bobinado producen cambios muy pequeños en el flujo magnético. La corriente de bobinado y el flujo magnético son proporcionales a la tensión de entrada y salida, respectivamente. Esto significa que los cambios relativamente grandes en el voltaje de entrada producen pequeños cambios en la tensión de salida: este es el propósito fundamental de un regulador de voltaje automático. (perfec, 2017).

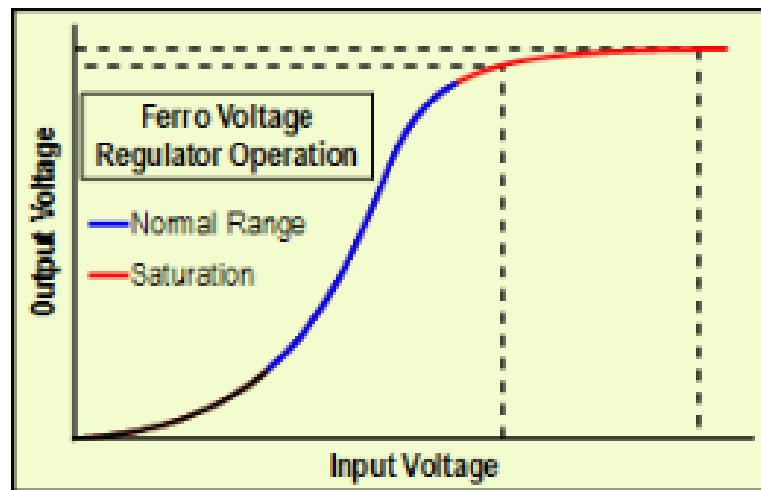


Figura 3. versión simplificada de la curva de magnetización. (perfec, 2017).

El gráfico muestra una versión simplificada de una curva de magnetización para demostrar este concepto. En la región de saturación de la curva (rojo), un gran cambio en el voltaje de entrada produce un pequeño cambio en la tensión de salida. La operación en la región de saturación tiene la desventaja de una eficiencia eléctrica muy pobre. Los transformadores de potencia estándar están diseñados para operar en el rango normal (azul) donde la eficiencia eléctrica es mayor. (perfec, 2017).

Mientras que los transformadores de potencia estándar tienen alguna capacidad mínima para la regulación de voltaje, su propósito principal es transformar voltaje de un nivel a otro (por ejemplo, convertir 480V a 208V) con mayor eficiencia eléctrica. (perfec, 2017).

Ventajas y desventajas del transformador Ferroresonante. (perfec, 2017).

Ventajas. (perfect., 2017).

El regulador de ferro-voltaje, por su diseño único, proporciona un buen aislamiento del equipo de carga del ruido de la línea y de las sobretensiones. La regulación del voltaje de salida también es suave, siempre y cuando el fabricante haya tomado medidas para minimizar la distorsión que es causada por el funcionamiento en la región de



saturación. Los reguladores de tensión de hierro pueden ser muy duraderos con algunos fabricantes que ofrecen garantías de más de 10 años. (perfect., 2017).

Una característica de funcionamiento inusual del regulador del ferro-voltaje es que su diseño puede limitar la cantidad de corriente a la carga. Cuando la corriente de carga excede aproximadamente el 150% de la corriente nominal de un regulador de ferro-voltaje, la unidad se extrae de la región de saturación, la tensión de salida se colapsa a un valor muy pequeño y la corriente queda limitada. En algunas aplicaciones, esta característica se utiliza intencionalmente para proteger cargas de altas corrientes, sin embargo, en otras aplicaciones esta característica se convierte en una desventaja sustancial. (perfect., 2017).

Desventajas. (perfect., 2017).

El principio de magnetismo que proporciona el regulador de ferro-voltaje su capacidad de regulación de voltaje es también su talón de Aquiles. Los reguladores de voltaje de este tipo pueden tener eficiencias eléctricas hasta un 92% a plena carga y condiciones ideales, pero a cargas más ligeras la eficiencia cae sustancialmente. El gráfico muestra un rango típico de eficiencia de hierro versus porcentaje de carga. Se puede observar que al 50% de carga, la eficiencia del regulador de ferro-tensión oscila entre 75 y 85%. Como comparación, un transformador de potencia típico tendría una eficiencia del 90% o más con un 50% de carga. (perfect., 2017).

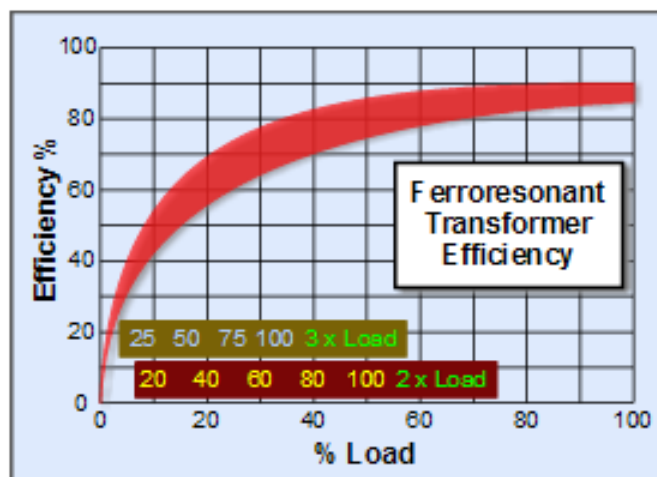


Figura 4. Rango típico de eficiencia de hierro versus porcentaje de carga. (perfect., 2017).

En aplicaciones con altas corrientes de sobrecarga o de arranque, es común que el transformador de voltaje constante sea sobredimensionado en 2 a 3 veces la corriente de carga nominal. Esto es para permitir que el regulador de ferro-tensión pase suficiente corriente antes de que la tensión de salida se colapse como se ha descrito anteriormente. Sin embargo, sobredimensionar el regulador de voltaje constante reduce en gran medida su eficiencia. Las escalas insertadas en la parte inferior derecha del gráfico demuestran lo que sucede con la eficiencia cuando un regulador de voltaje constante es sobredimensionado por un factor de 2 o 3 veces la carga: a 3X la eficiencia incluso al 75% de carga sólo alcanza del 60 al 75%. (perfect., 2017).

## **2. Metodología de diseño del transformador ferroresonante utilizable como equipo acondicionador del voltaje.**

Con respecto a la metodología de diseño nos guiamos por el libro TRANSFORMER AND INDUCTOR DESIGN HANDBOOK ThirdEdition, Revised and Expanded donde dedican un capítulo completo para el diseño de un transformador de voltaje constante claro es una variante del transformador de voltaje constante.(MCLYMAN, 3 edition (February 18, 2009)).

El voltaje primario, se puede limitar a una amplitud predeterminada mediante el uso de un transformador de auto-saturación, que tiene alta impedancia, hasta que se alcanza un cierto nivel de densidad de flujo. En esa densidad de flujo, el transformador se satura y se convierte en una ruta de baja impedancia, lo que evita una mayor acumulación de voltaje en el condensador. Esta acción limitante produce una forma de onda de voltaje que tiene una característica superior bastante plana en cada medio ciclo.(MCLYMAN, 3 edition (February 18, 2009)).

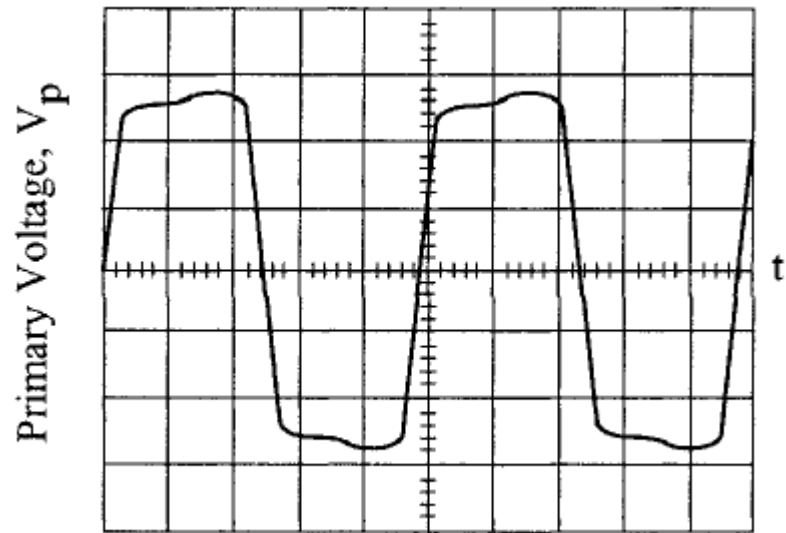


Figura 5. Forma de onda de voltaje primario de un transformador de voltaje constante(MCLYMAN, 3 edition (February 18, 2009)).

#### Parámetros eléctricos de un regulador de línea CVT

Cuando el transformador de voltaje constante está funcionando como un regulador de línea, el voltaje de salida variará como función del voltaje de entrada. El material magnético utilizado para diseñar el transformador, tiene un impacto en la regulación de línea. Los transformadores diseñados con un bucle cuadrado darán como resultado una mejor Regulación de línea. Si la salida del regulador de línea está sujeta a un factor de potencia de carga (retraso) con menos que la unidad, la salida cambiará. (MCLYMAN, 3 edition (February 18, 2009))

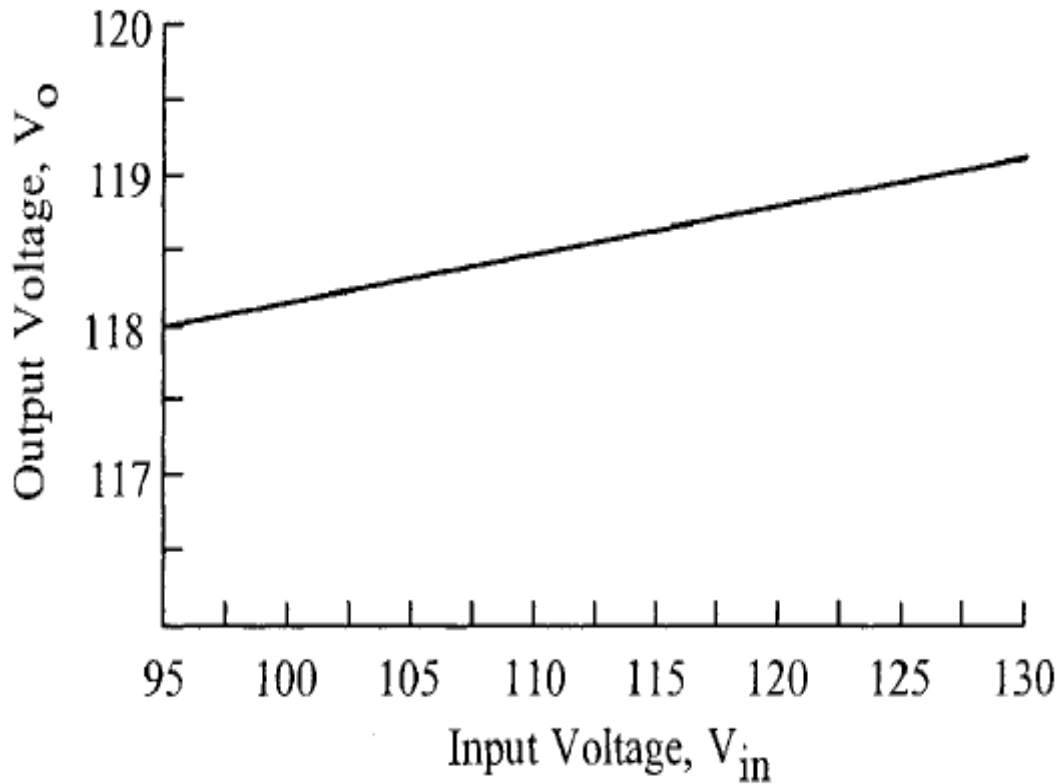


Figura 6. Variación del voltaje de salida, como una función del voltaje de entrada.  
(MCLYMAN, 3 edition (February 18, 2009)).

La regulación de voltaje de salida de un transformador de voltaje constante, para un cambio en el voltaje de línea, es una función de la escuadra del bucle B-H. La densidad de flujo de saturación,  $B_s$ , es dependiente en el proceso de recocido del material magnético. Parece que cada fabricante tiene su propio recocido proceso, que tiene un impacto en la densidad de flujo de saturación,  $B_s$ .

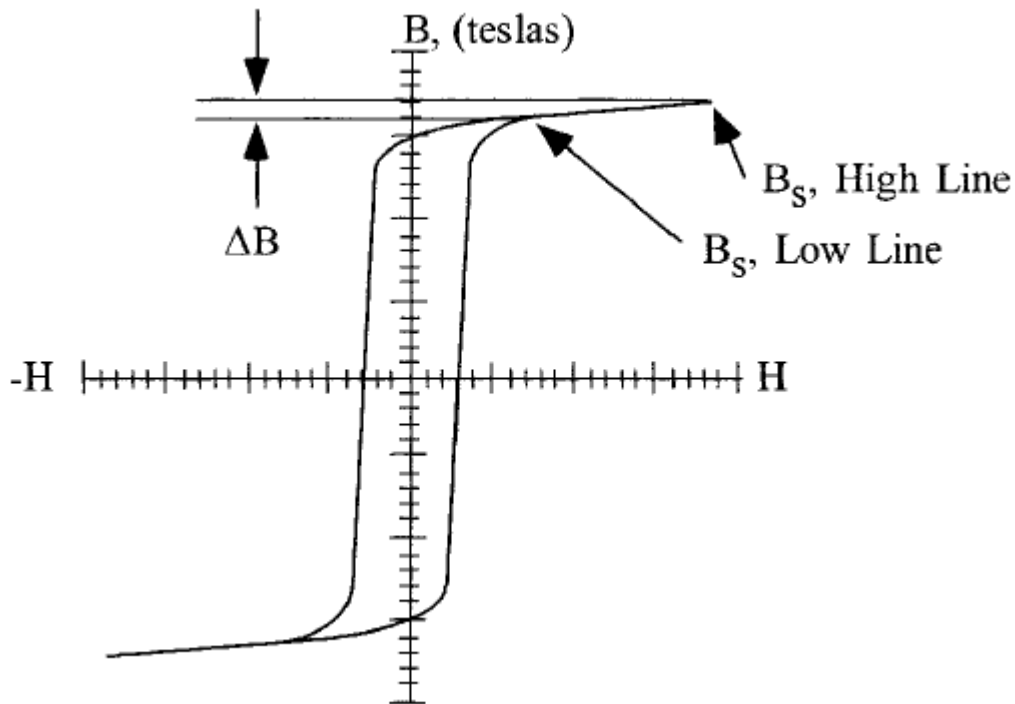


Figura 7. Ciclo de histéresis especificando la zona de saturación. (MCLYMAN, 3 edition (February 18, 2009)).

Lo que hicimos en nuestra investigación es que por medio de la investigación teórica realizada y bajos los criterios del diseño de transformadores y de esta manera se hicieron prototipos de diseño luego hacer pruebas de ensayo y error hasta lograr el diseño más óptimo.

En nuestro diseño solo tomamos los valores nominales del transformador.

$$V_{in} = 120 \text{ volts}$$

$$F = 60 \text{ hertz} \quad V_{out} = 120 \text{ volts}$$

$$P_{out} = 300 \text{ VA} \quad B_s = 1.5 \text{ tesla (densidad de flujo de saturación)}$$

Ecuaciones para los bobinados del transformador del transformador.

$$N_p = \frac{V_p * (10^4)}{K_f * B_s * A_c * f}$$

$$N_s = \frac{V_s * (10^4)}{K_f * B_s * A_c * f}$$

$$N_t = \frac{V_t * (10^4)}{K_f * B_s * A_c * f}$$

Ecuaciones para determinar el campo magnético y la intensidad de campo magnético en el núcleo del transformador.

Para determinar la saturación del transformador se propuso realizar unas pruebas ya que no tenemos las componentes químicas de la chapa del transformador y así estimar el punto de saturación del núcleo del transformador utilizado en la investigación.

$$1. V = K * N * F * \phi$$

$$2. \phi = B * S$$

Sustituyendo 2 en 1 y despejando B.

$$B = \frac{V_p * (10^4)}{K_f * N * A_c * f}$$

De la siguiente igualdad despejamos H.

$$N * I = H * L$$

$$H = \frac{N * I}{L}$$

Con un programa realizado por el compañero Juan Andrés Leal Pérez en su tesis de grado que trata sobre la caracterización del núcleo de los transformadores y de esta manera determinar el punto de saturación la cual varía dependiendo de la chapa que se esté utilizando para el transformador.

De acuerdo con el razonamiento que se ha venido realizando luego de parametrizar el núcleo lo que se quiere es determinar el punto de saturación del transformador y por consiguiente realizar las respectivas pruebas y conectando un capacitor de corriente alterna en el devanado terciario del transformador y lograr una saturación mucho más alta que la establecida en las pruebas de caracterización.

Hechas las consideraciones anteriores por medio de las pruebas realizadas mediante ensayo y error determinar la capacitancia más optima y de esta manera lograr una regulación de voltaje en la salida hacia la carga o en el bobinado secundario.

Para los cálculos de la corriente se determina a partir de la capacitancia y la potencia y estos cálculos se certifican por medio de pruebas en carga del transformador.

El cálculo de la corriente en el bobinado secundaria se determina por la siguiente ecuación.

$$I_s = \frac{P_o}{V_s} [amps]$$

Corriente en el bobinado terciario

$$I_c = V * w * C [amps]$$

La corriente primaria se determina a partir de las pruebas por la cual se estableció el rango de variación de la corriente primaria.

La densidad de flujo se determina a partir de la tabla obtenida en el libro mantenimiento de máquinas eléctricas del autor Juan José manzano.

$$J = 3 [A/mm^2]$$

Área del conductor en milímetros cuadrados

$$A_p = \frac{I_p}{J} [mm^2]$$

$$A_s = \frac{I_s}{J} [mm^2]$$

$$A_c = \frac{I_c}{J} [mm^2]$$

Selección del conductor a partir del área obtenida en el cálculo anterior.

Perdidas en los conductores de los bobinados.

$$R = r * km [\Omega * km]$$

$$P_p = (I_p)^2 * R_p [watts]$$

$$P_s = (I_s)^2 * R_s [watts]$$

$$P_c = (I_c)^2 * R_c [watts]$$

$$P_{cu} = P_p + P_s + P_c$$

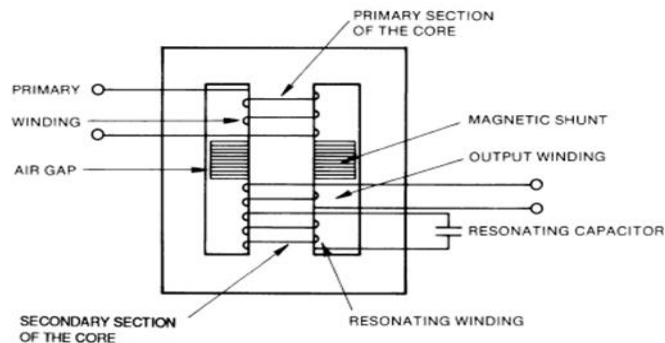


A manera de resumen por medio de todos los cálculos anteriores se establece la corriente máxima en cada bobinado a partir de las variaciones hechas en las pruebas y en los cálculos. Así se determina el fusible a utilizar en cada uno de los bobinados del transformador. Y establecer de manera segura una protección se la tensión se llega a elevar más de lo que puede soportar el transformador y quemar los devanados.

### 3. Simular el regulador de voltaje basado en un transformador ferroresonante.

La simulación se realizó en el programa de Matlab ya que podemos evidenciar por medio de la curva del ciclo de histéresis cuando el transformador está operando con normalidad o está operando en ferroresonancia. También podemos evidenciar el efecto resonante del capacitor al conectarlo al transformador. Y cuáles son los efectos al simular una elevación o depresión de voltaje en la curva de histéresis del transformador.

La configuración para la conexión del transformador es la ferroresonancia serie que se investigó en la norma (IEEE Standard for Ferroresonant Voltage Regulators) ya que existen múltiples



conexiones para diferentes propósitos aparte de la regulación de voltaje.

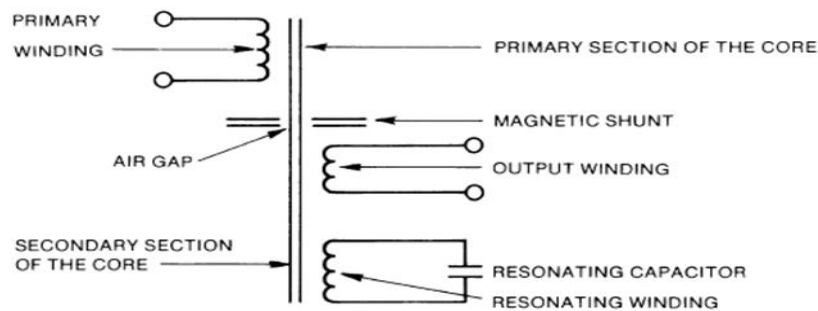
Figura 8. común desde el regulador de tensión del transformador ferroresonante.

Figura9.esquemático de un común desde el regulador de tensión del transformador ferroresonante.

Zona de saturación en el ciclo de histéresis Matlab.

En la imagen vemos un diagrama de conexiones que se realizó en Matlab simulink, donde tenemos el transformador saturable de Matlab una fuente de tensión y los respectivos medidores de tensión y corriente.

También podemos observar un multímetro y un XY graph en el cual tomaremos medición de la corriente de magnetización del transformador y flujo del transformador. Con estas variables podemos construir la curva de histéresis del transformador y así identificamos el punto en el que está operando el transformador.



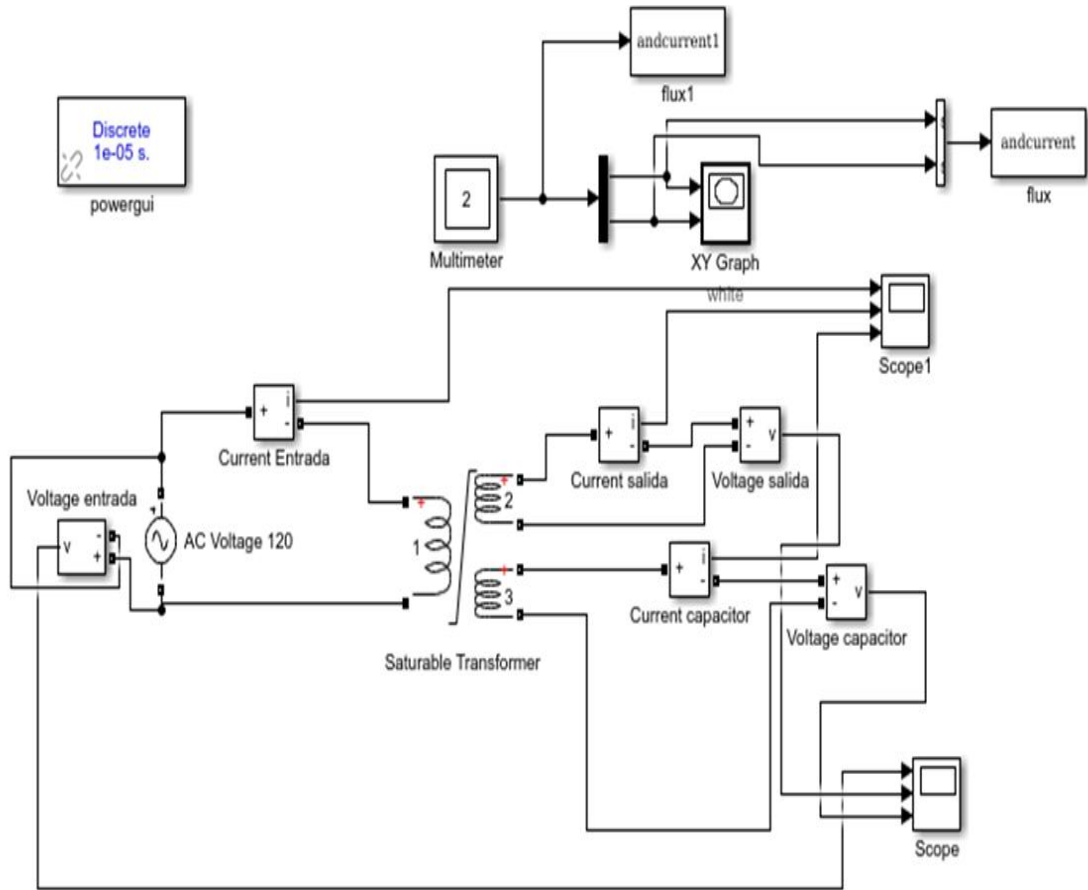


Figura 10. Fuente de voltaje a 120 v sin la conexión del capacitor.

En la imagen podemos observar la curva del ciclo de histéresis para la configuración sin el capacitor conectado al transformador y con un voltaje en la fuente de 120 v. obtenida de la configuración antes explicada en el programa de simulink de Matlab.

Aquí podemos evidenciar el punto en el que se encuentra operando el transformador saturable de Matlab, de esta manera podemos mediante las pruebas llegar al punto de operación deseado de manera óptima.

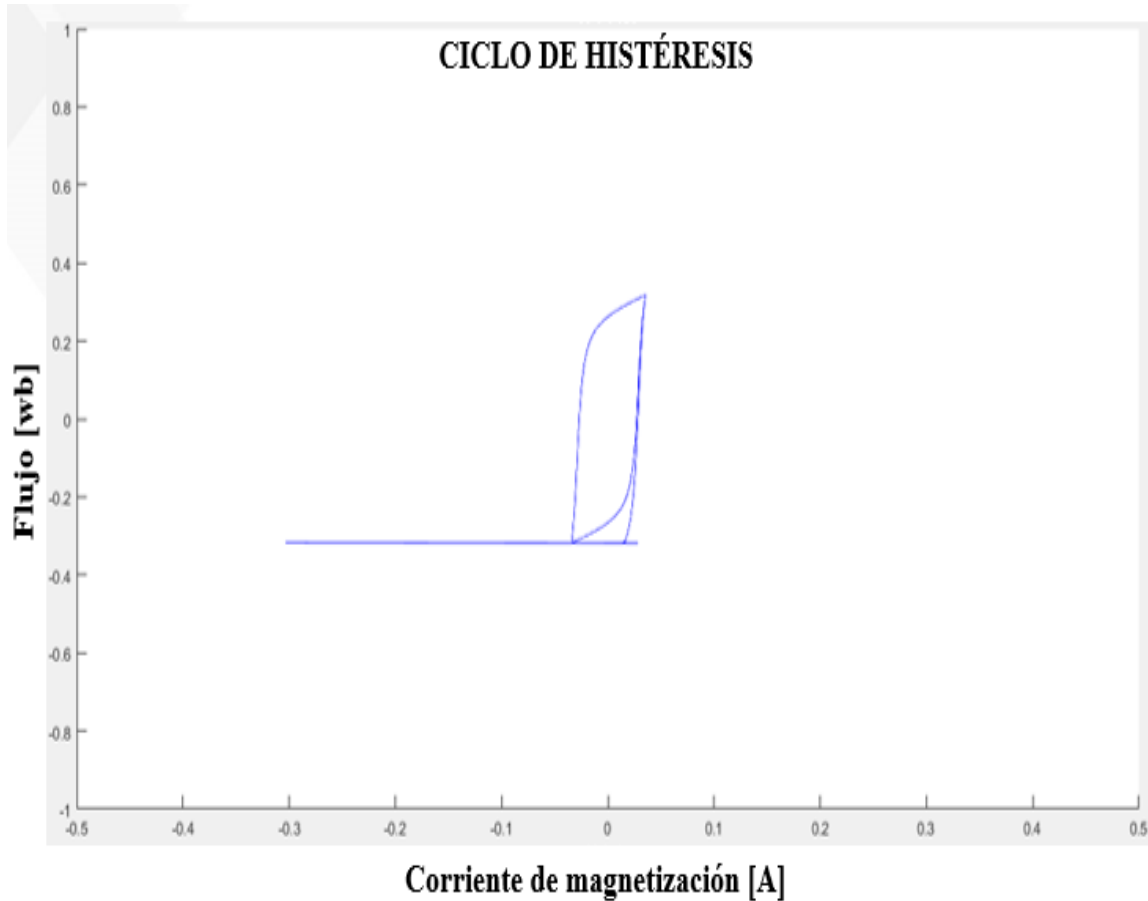


Figura 11. Ciclo de histéresis para Fuente de voltaje a 120 v sin la conexión del capacitor.

En la imagen vemos un diagrama de conexiones que se realizó en Matlab simulink, donde tenemos el transformador saturable de Matlab una fuente de tensión y los respectivos medidores de tensión y corriente.

También podemos observar un multímetro y un XY graph en el cual tomaremos medición de la corriente de magnetización del transformador y flujo del transformador. Con estas variables podemos construir la curva de histéresis del transformador y así identificamos el punto en el que está operando el transformador. Con la variante que esta vez

colocamos un capacitor de  $30\mu\text{F}$  conectado con el bobinado terciario del transformador saturable de matlab y un voltaje de entrada en el primario del transformador de 120 V.

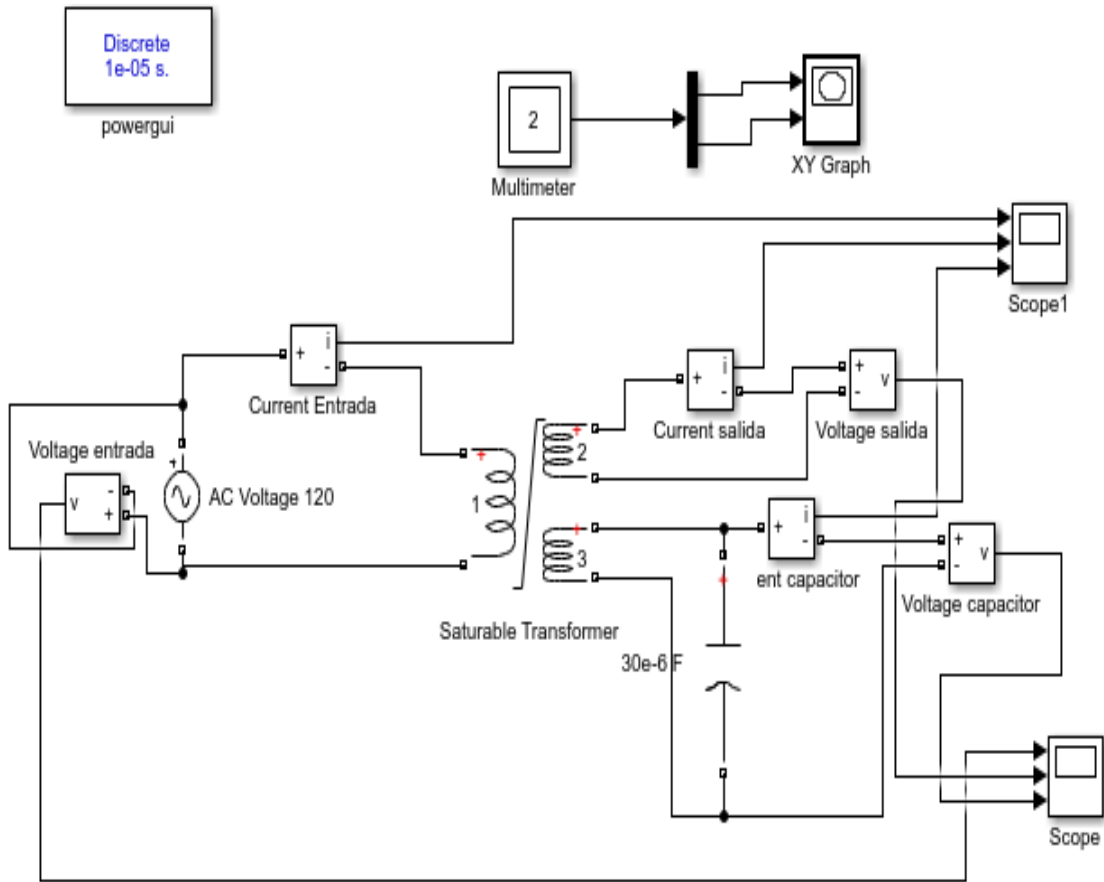


Figura 12. Fuente de 120 v y conexión del capacitor de  $30\mu\text{F}$ .

En la imagen podemos observar la curva del ciclo de histéresis para la configuración con el capacitor de  $30\mu\text{F}$  conectado al transformador y con un voltaje en la fuente de 120 v. obtenida de la configuración antes explicada en el programa de simulink de Matlab.

Aquí podemos evidenciar el punto en el que se encuentra operando el transformador saturable de Matlab, de esta manera podemos mediante las pruebas llegar al punto de operación deseado de manera óptima.

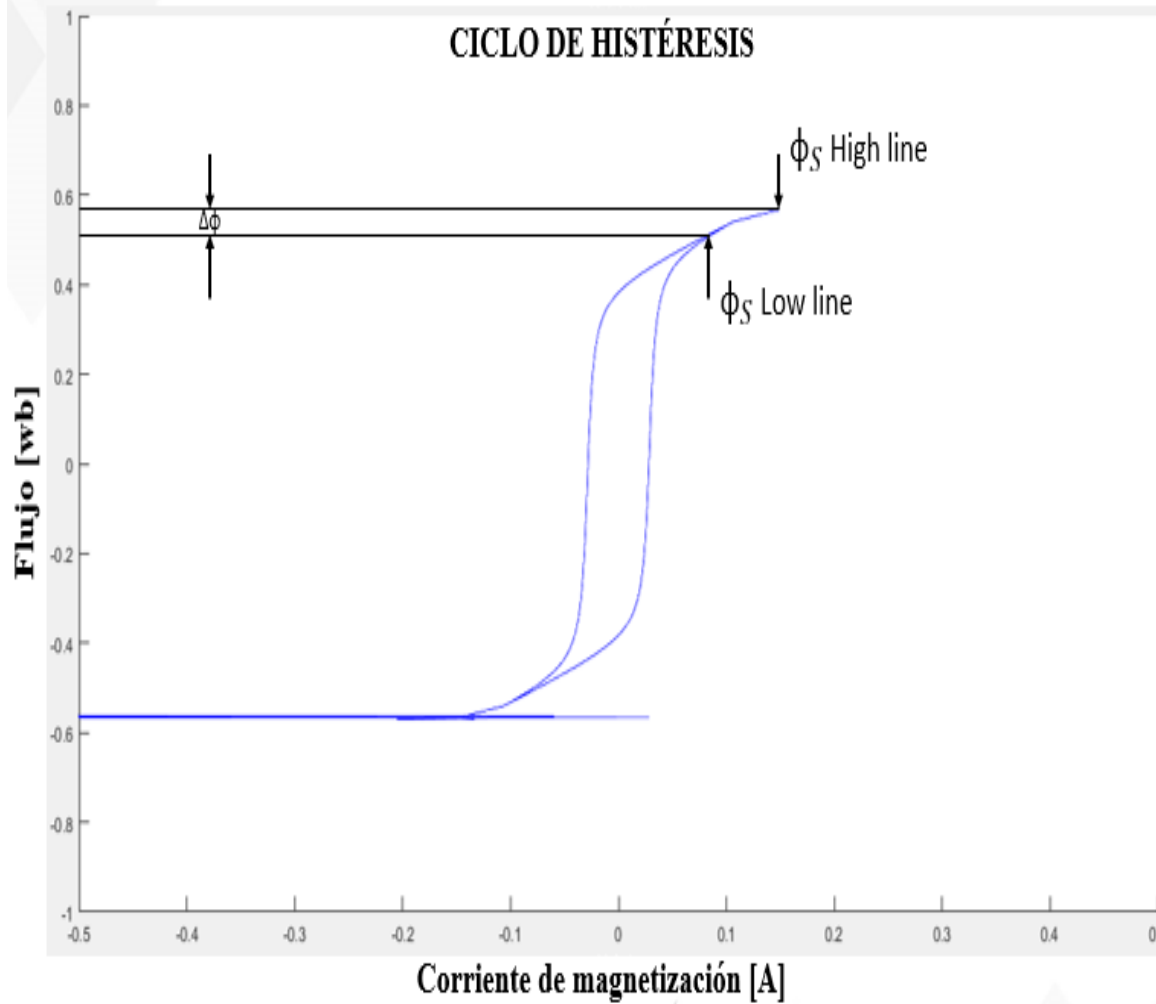


Figura 13. Ciclo de histéresis para Fuente de voltaje a 120 v con la conexión del capacitor de 30 $\mu$ F.

En la imagen vemos un diagrama de conexiones que se realizó en Matlab simulink, donde tenemos el transformador saturable de Matlab una fuente de tensión y los respectivos medidores de tensión y corriente.

También podemos observar un multímetro y un XY graph en el cual tomaremos medición de la corriente de magnetización del transformador y flujo del transformador. Con estas

variables podemos construir la curva de histéresis del transformador y así identificamos el punto en el que está operando el transformador. Con la variante que esta vez colocamos un capacitor de  $35\mu\text{F}$  conectado con el bobinado terciario del transformador saturable de matlab y un voltaj de entrada en el primario del transformador de 120 V.

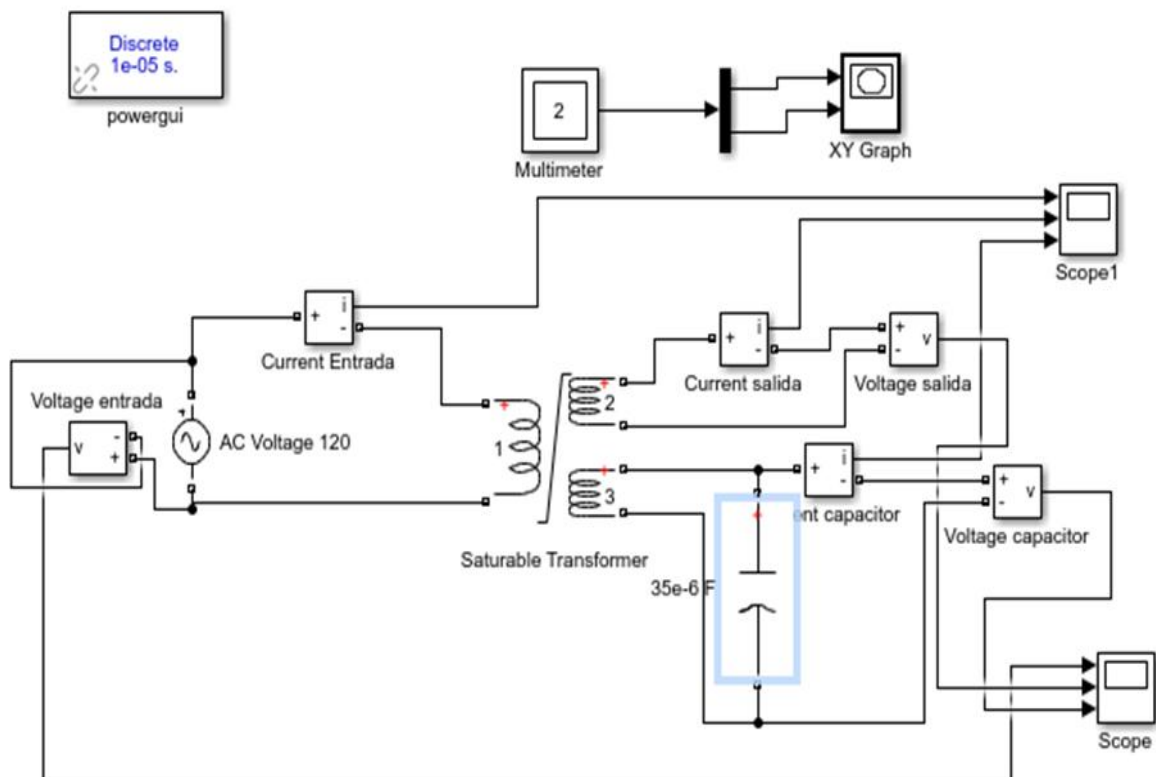


Figura 14. Fuente de 120 v y conexión del capacitor de  $35\mu\text{F}$ .

En la imagen podemos observar la curva del ciclo de histéresis para la configuración con el capacitor de  $35\mu\text{F}$  conectado al transformador y con un voltaje en la fuente de 120 v. obtenida de la configuración antes explicada en el programa de simulink de Matlab.



Aquí podemos evidenciar el punto en el que se encuentra operando el transformador saturable de Matlab, de esta manera podemos mediante las pruebas llegar al punto de operación deseado de manera óptima

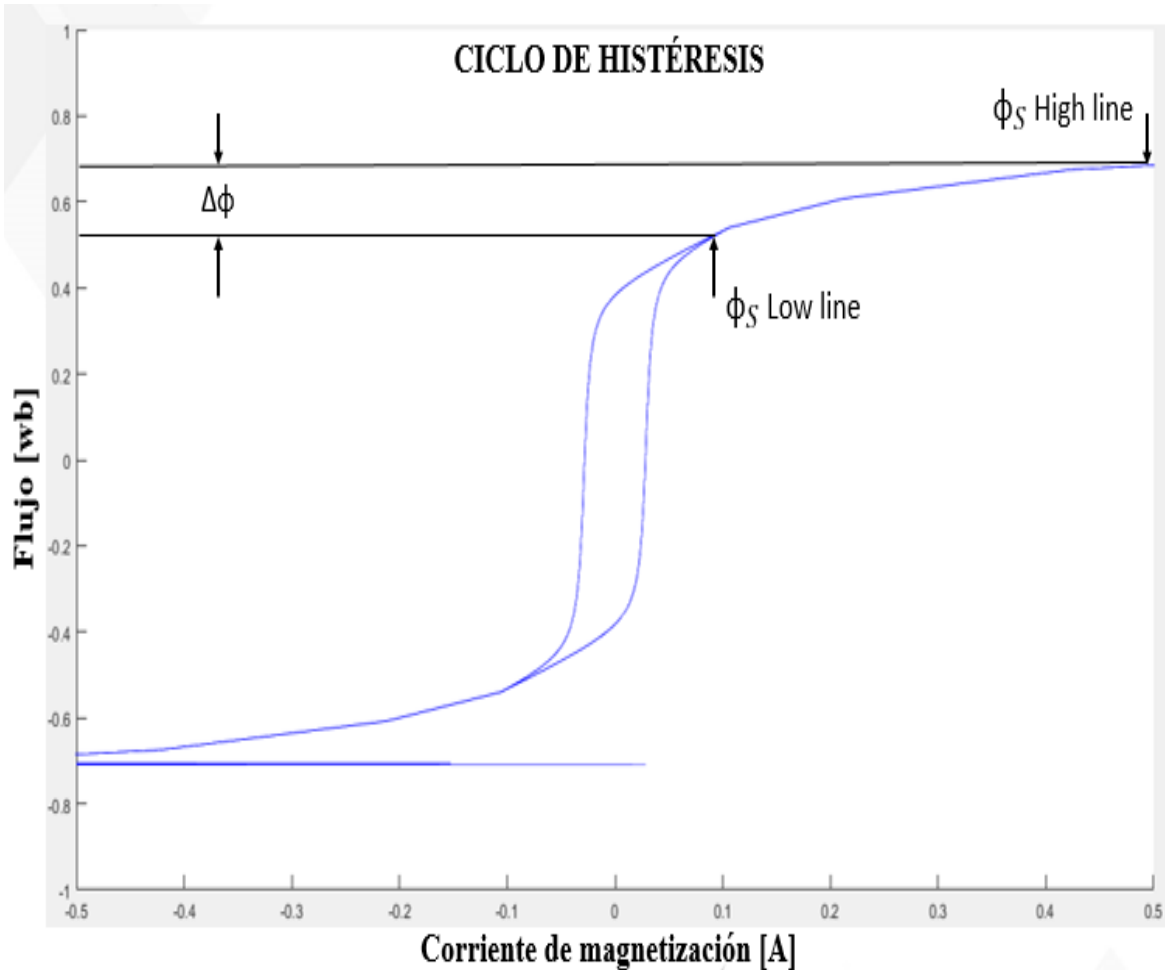


Figura 15. Ciclo de histéresis para Fuente de voltaje a 120 v con la conexión del capacitor de 35 $\mu$ F.

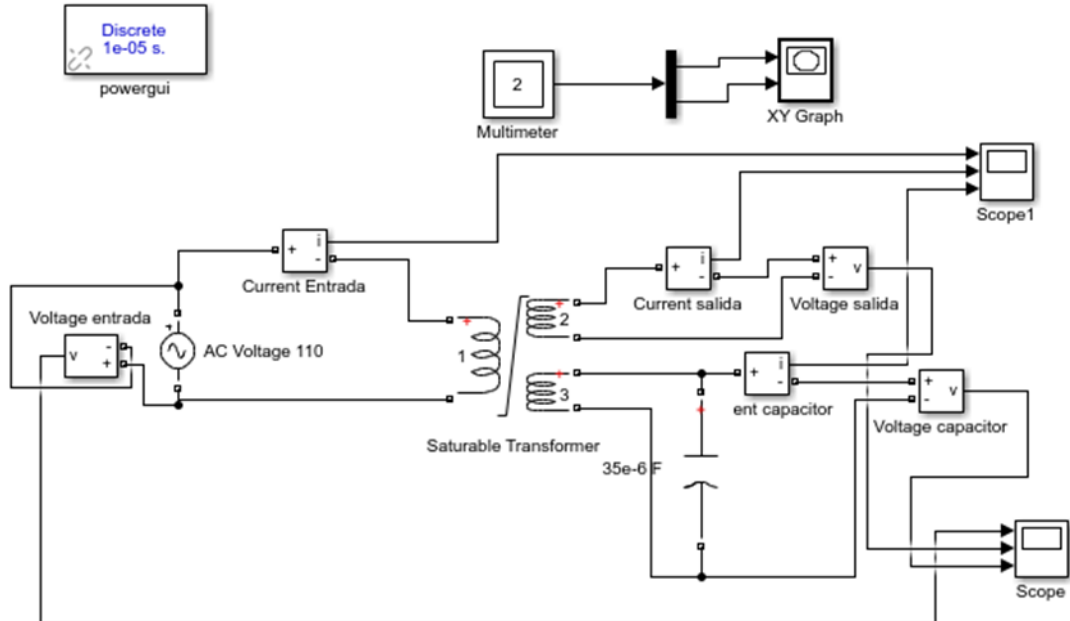
Como pudimos observar el transformador ya se encuentra trabajando en saturación debido a la capacitancia conecta en los bornes del devanado terciario. Ahora lo siguiente es variar la fuente de voltaje simulando una depresión y una elevación de la tensión en la red eléctrica. Y de esta manera observar como es el comportamiento del ciclo de histéresis de transformador.

En ese mismo sentido evidenciar que el transformador se encuentra esté operando en el punto deseado y así garantizar que el transformador esté operando en el rango de saturación.

Siguiendo con la misma metodología utilizada anteriormente en Matlab simulink con la variante que vamos a dejar fijo el capacitor y solo aremos variación en el voltaje y así de esta manera visualizar o evidenciar el comportamiento de la corriente de magnetización y el flujo en el núcleo del transformador. Ahora vez colocamos un capacitor de  $35\mu\text{F}$  conectado con el bobinado terciario del transformador saturable de Matlab y un voltaje de entrada en el primario del transformador de 110 V.

Figura 16. Fuente de 110 v, conexión del capacitor de  $35\mu\text{F}$ .

En la imagen podemos observar la curva del ciclo de histéresis para la configuración con



el capacitor de  $35\mu\text{F}$  conectado al transformador y con un voltaje en la fuente de 110 v. obtenida de la configuración antes explicada en el programa de simulink de Matlab.

En la siguiente grafica podemos evidenciar que a pesar que el voltaje en el primario disminuyo el flujo en el transformador no disminuyo en la misma escala, por lo tanto el transformador todavia se encuentra trabajando en saturación.

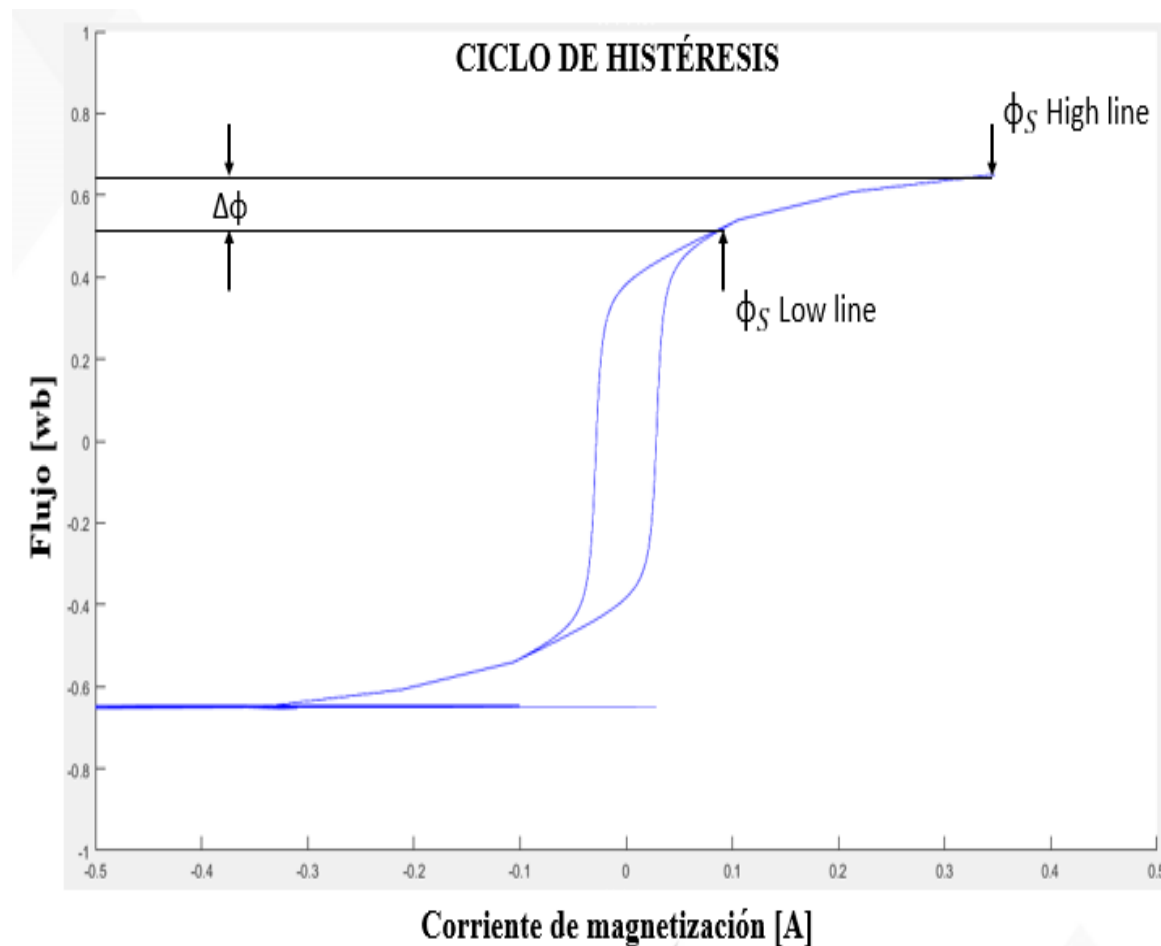


Figura 17. Ciclo de histéresis para Fuente de voltaje a 110 v con la conexión del capacitor de 35 $\mu$ F.

Siguiendo con la misma metodología utilizada anteriormente en Matlab simulink con la variante que vamos a dejar fijo el capacitor y solo aremos variación en el voltaje y así de

esta manera visualizar o evidenciar el comportamiento de la corriente de magnetización y el flujo en el núcleo del transformador. Ahora vez colocamos un capacitor de  $35\mu\text{F}$  conectado con el bobinado terciario del transformador saturable de Matlab y un voltaje de entrada en el primario del transformador de 100 V.

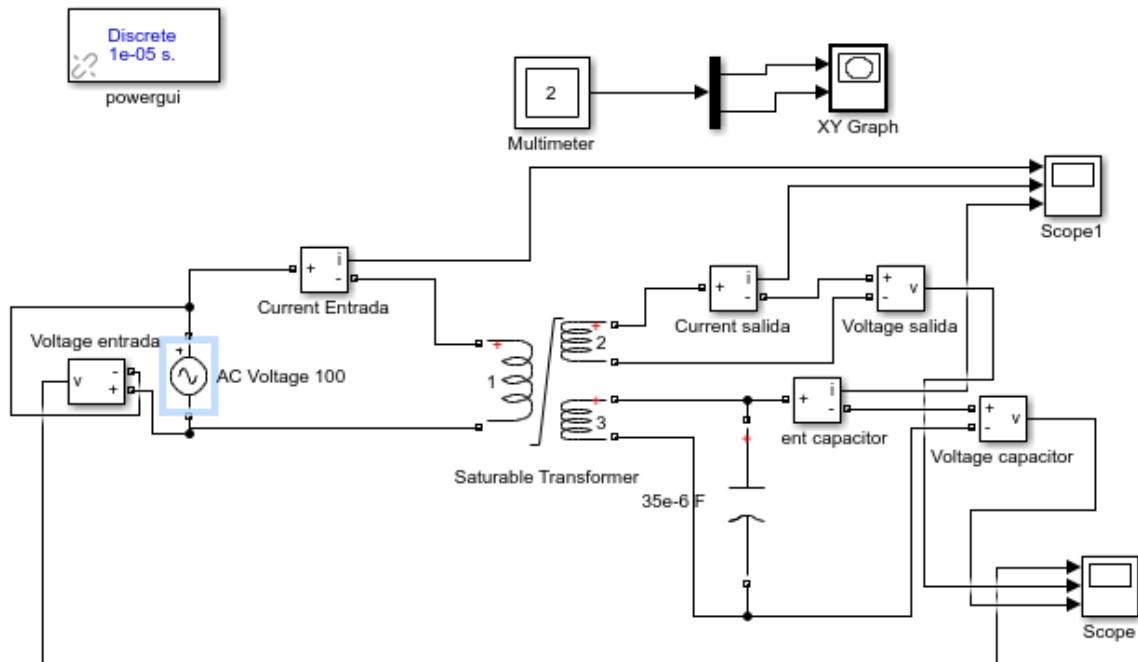


Figura 18. Fuente de 100 v, conexión del capacitor de  $35\mu\text{F}$ .

En la imagen podemos observar la curva del ciclo de histéresis para la configuración con el capacitor de 35 $\mu$ F conectado al transformador y con un voltaje en la fuente de 100 v. obtenida de la configuración antes explicada en el programa de simulink de Matlab.

En la siguiente grafica podemos avdenciar que a pesar que el voltaje en el primario disminuyo el flujo en el transformador no disminuyo en la misma escala, por lo tanto el transformador todavia se encuentra trabajando en saturación.

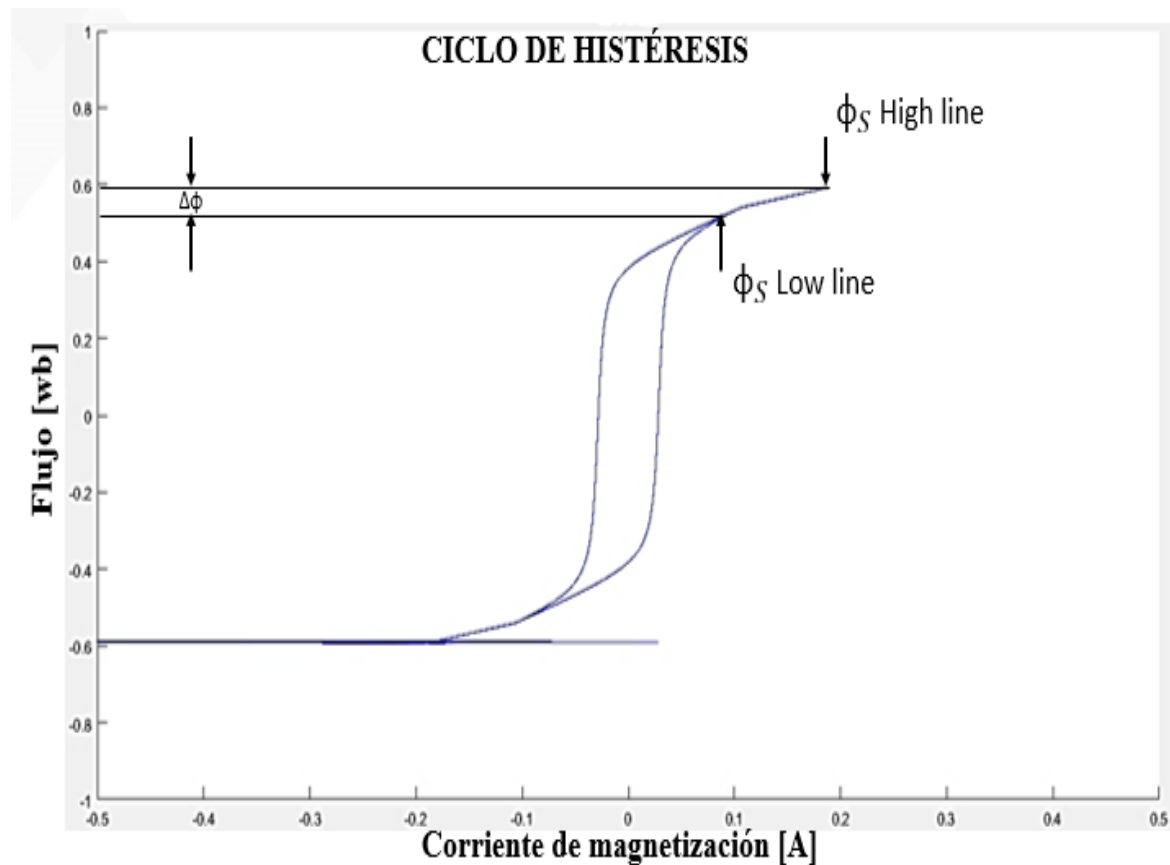


Figura 19. Ciclo de histéresis para Fuente de voltaje a 100 v con la conexión del capacitor de 35 $\mu$ F.

Como consecuencia de este estudio realizado en el programa Matlab validamos que el capacitor conectado en el bobinado terciario del transformador genera un efecto

resonante en el transformador logrando que el mismo mantenga su operación en estado de saturación, para controlar el nivel de saturación se tiene que controlar que capacitancia poner en el transformador y así controlar el flujo de saturación en el núcleo del transformador y finalmente lograr un variación muy pequeña en el devanado secundario a partir de una gran variación de voltaje en el primario del transformador. Teniendo como consecuencia una regulación de voltaje bastante óptima para proteger equipos sensibles a elevaciones y depresiones de voltaje.



## 4. Implementar el transformador ferroresonante a partir de los cálculos obtenidos.

Para el diseño del transformador ferroresonante nos basamos en la bibliografía obtenida apoyándonos con las pruebas prácticas y lograr el mejor alcance posible respecto al objetivo que es la regulación del voltaje.

Para el cálculo del área del núcleo se utilizó la ecuación empírica:

Área del núcleo

$$S_n = \sqrt{P}$$

$S_n =$  sección del núcleo en  $cm^2$

$P =$  potencia aparente en VA

$$S_n = \sqrt{324}$$

$$S_n = 18 \text{ cm}^2$$

Numero de vueltas del transformador en el primario, secundario y terciario.

$$N_p = \frac{V_p * (10^4)}{K_f * B_s * A_c * f}$$

$f =$  frecuencia

$K_f =$  factor de forma

$B_s =$  campo magnetico de saturación

$A_c =$  área del núcleo

$V_p =$  voltaje del primario



$$N_p = \frac{120 * (10^4)}{4.44 * 1.5 * 18.02 * 60}$$

$$N_p = 166 \text{ [Vueltas]}$$

#### Devanado secundario

$$N_s = \frac{V_s * (10^4)}{K_f * B_s * A_c * f}$$

$$N_s = \frac{120 * (10^4)}{4.44 * 1.5 * 18.02 * 60}$$

$$N_s = 166 \text{ [Vueltas]}$$

#### Devanado terciario

$$N_t = \frac{V_t * (10^4)}{K_f * B_s * A_c * f}$$

$$N_t = \frac{220 * (10^4)}{4.44 * 1.5 * 18.02 * 60}$$

$$N_t = 300 \text{ [Vueltas]}$$

#### Parametrización del núcleo del transformador

Se energizó el transformador en vacío a voltaje nominal variando el voltaje desde cero hasta llegar al voltaje nominal y debido a los parámetros de voltaje y corriente obtenidos pudimos determinar o hacer una aproximación del punto de saturación del núcleo del transformador.

Ecuaciones para la parametrización del núcleo del transformador

Calculo del campo magnético a partir del voltaje. Previo a la prueba se hizo un diseño del transformador a 1.5 Teslas a voltaje nominal 120 V y de esta manera determinar el respectivo número de vueltas en el núcleo del transformador.

Ecuaciones para la caracterización del núcleo.

Campo magnético

$$3. V = K * N * F * \phi$$

$$4. \phi = B * S$$

Sustituyendo 4 en 3 y despejando el campo magnético

$$B = \frac{V_p * (10^4)}{K_f * N * A_c * f}$$

$$K_f = 4.44$$

$$N = 166 \text{ vueltas}$$

$$A_c = 18.02 \text{ cm}^2$$

$$f = 60 \text{ Hz}$$

Calculo de la intensidad de campo magnético

$$N * I = H * L$$

$$H = \frac{N * I}{L}$$

$$N = 166 \text{ vueltas}$$

$$L = 0.332 \text{ m}$$

Después de las consideraciones anteriores podemos determinar la curva de magnetización del transformador tomando lecturas de voltaje y corriente en el mismo.

Este estudio se realizó con un programa para caracterizar núcleo de transformadores de la tesis de grado del compañero Juan Andrés Leal Pérez. Universidad de pamplona.

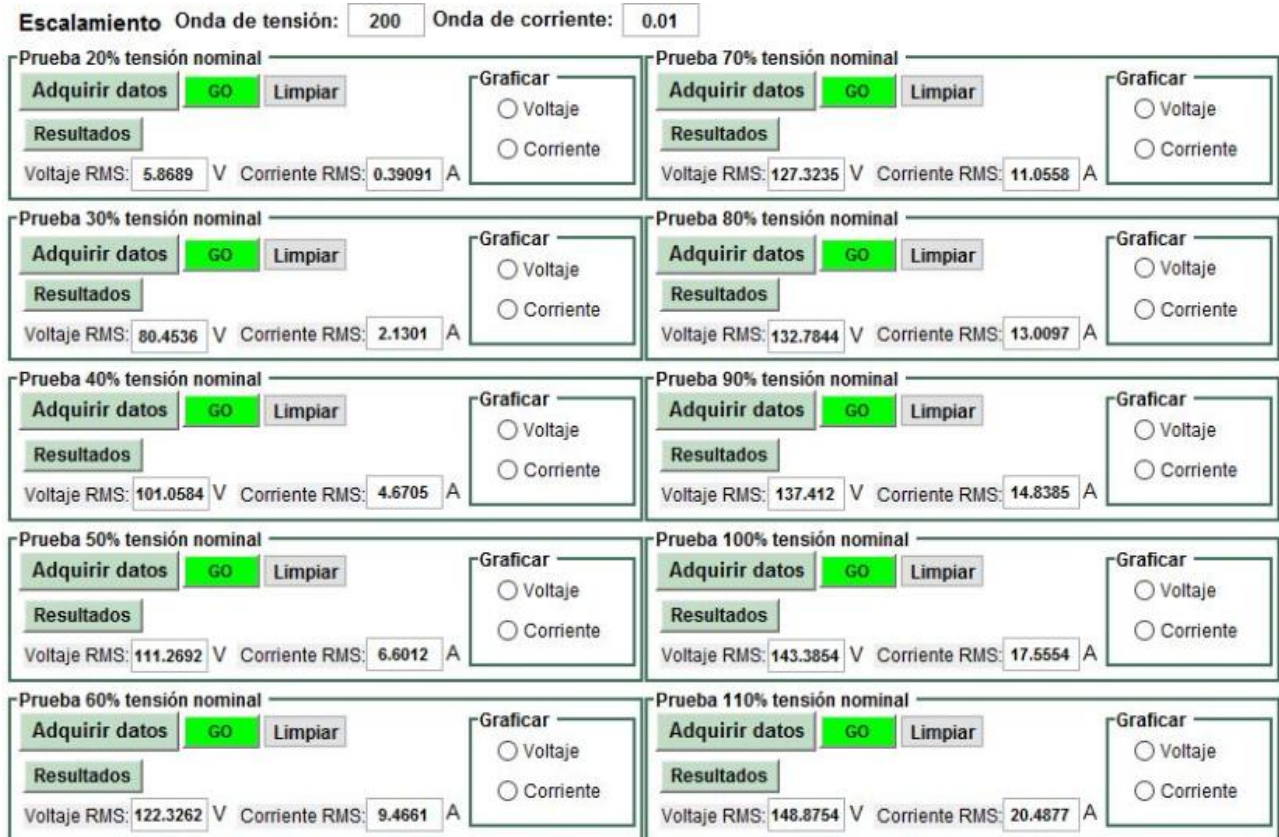


Figura 20. Valores de voltaje y corriente del transformador en vacío.

Luego de obtener los valores de corriente y voltaje consecuentemente realizar las ecuaciones respectivas para determinar el campo magnético e intensidad de campo magnético pudimos plotear la curva de magnetización respectiva del transformador.

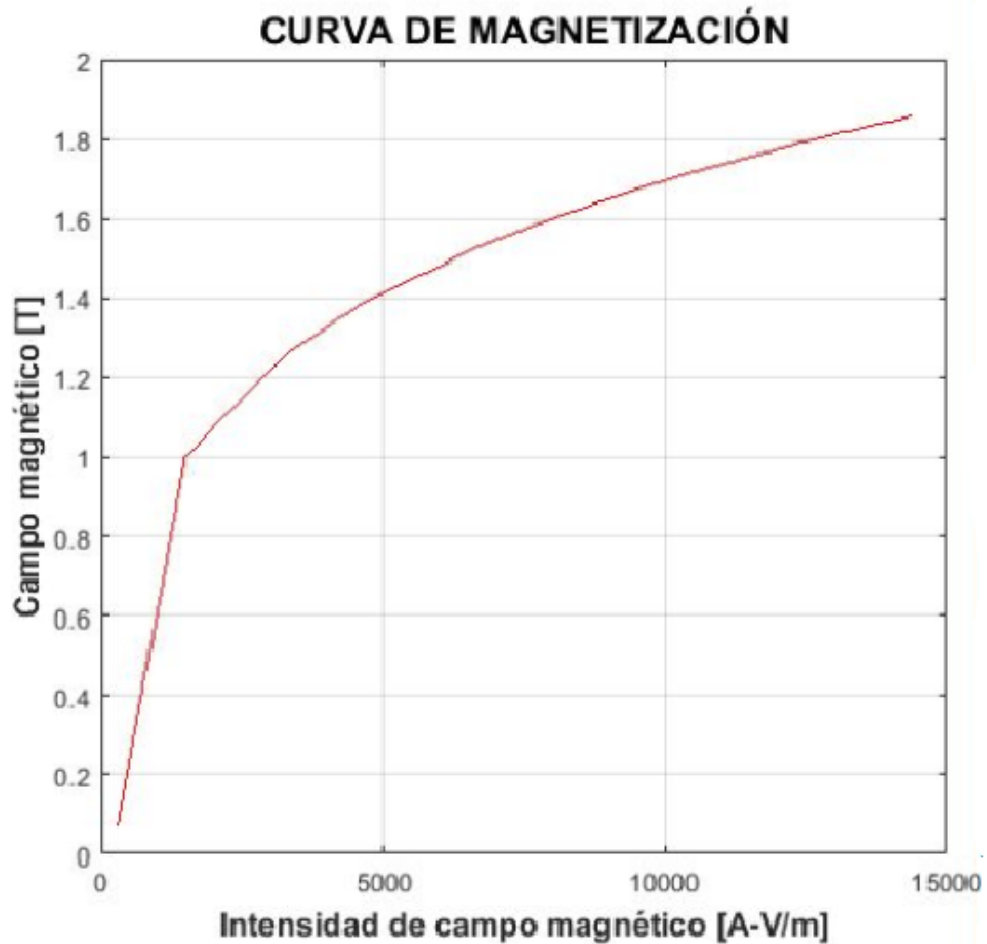


Figura 21. Curva de magnetización del transformador a partir de los valores de voltaje y corriente obtenidos.

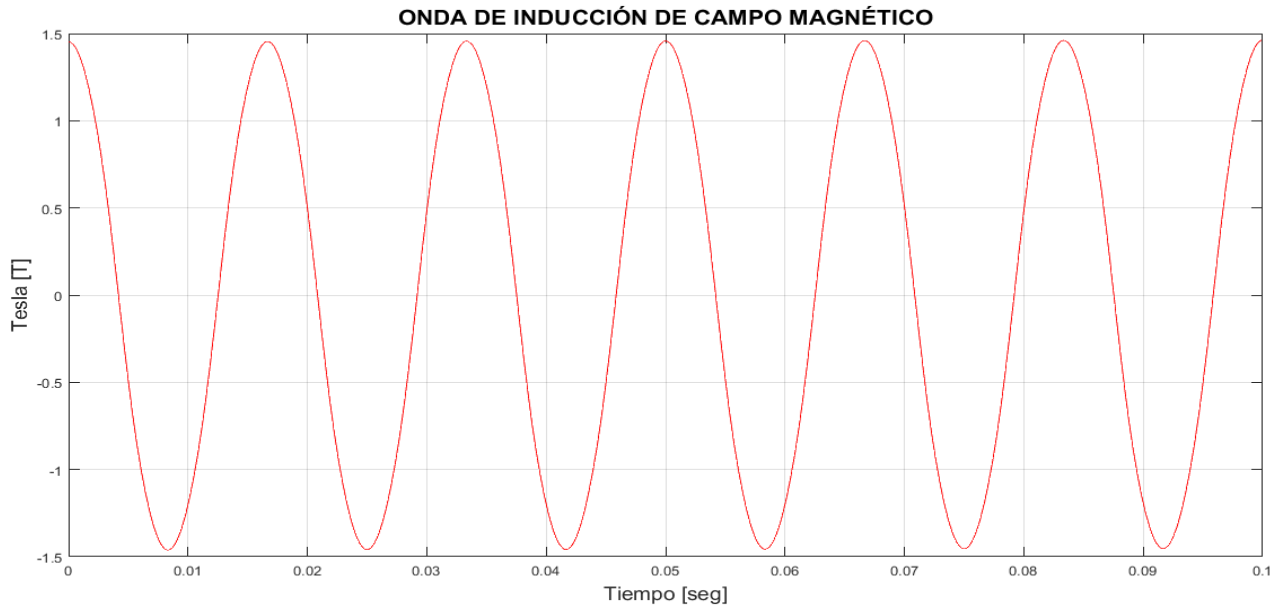


Figura 22. Onda de inducción de campo magnético a 120 V.

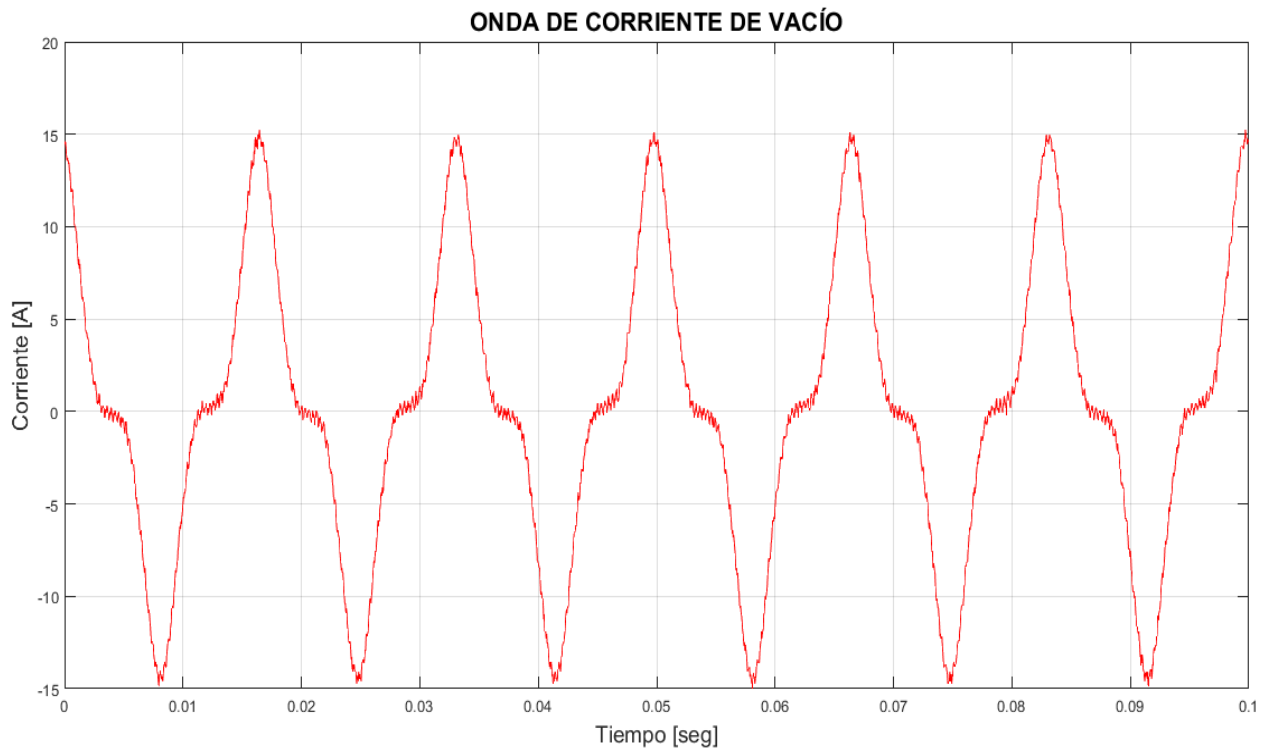


Figura 23. Onda de corriente a 120 V.

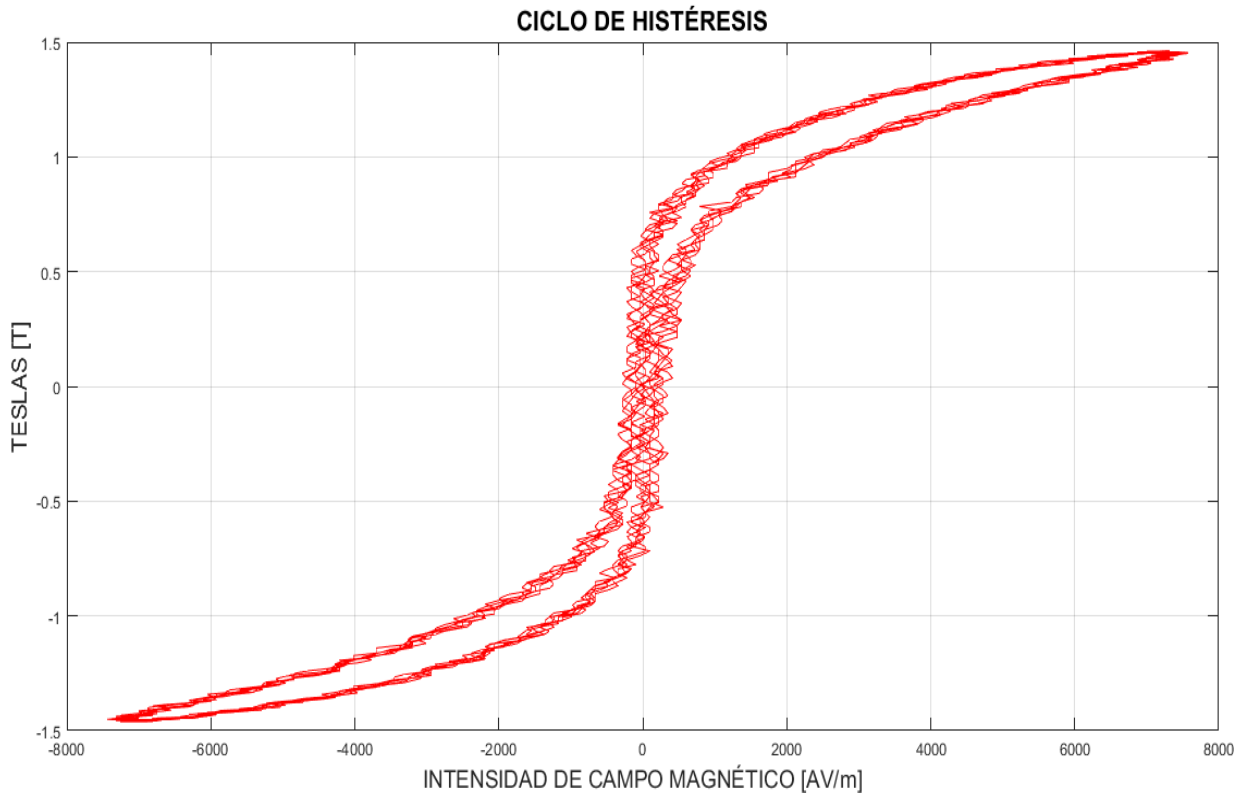


Figura 24. Ciclo de histéresis del transformador a 120 V.

Sobre la base de las consideraciones anteriores determinamos que para que el transformador este trabajando en constante saturación se debe mantener el ciclo de histéresis por encima de 1.5 Teslas y logra una regulación de voltaje óptima.

Bajo los resultados obtenidos en esta prueba tenemos el fundamento para el diseño del transformador ferresonante. En efecto realizamos el diseño a 1.5 Teslas y así determinamos el número de vueltas de los bobinados del transformador.

#### Devanado primario

$$N_p = \frac{V_p * (10^4)}{K_f * B_s * A_c * f}$$

$$N_p = \frac{120 * (10^4)}{4.44 * 1.5 * 18.02 * 60}$$

$$N_p = 166 \text{ [Vueltas]}$$

Devanado secundario

$$N_s = \frac{V_s * (10^4)}{K_f * B_s * A_c * f}$$

$$N_s = \frac{120 * (10^4)}{4.44 * 1.5 * 18.02 * 60}$$

$$N_s = 166 \text{ [Vueltas]}$$

Devanado terciario

$$N_t = \frac{V_t * (10^4)}{K_f * B_s * A_c * f}$$

$$N_t = \frac{220 * (10^4)}{4.44 * 1.5 * 18.02 * 60}$$

$$N_t = 300 \text{ [Vueltas]}$$

Para determinar la saturación necesaria para que exista una regulación de voltaje en el secundario a partir de la variación de voltaje en el primario se realizaron una serie de pruebas con distintos capacitores hasta logra la efectiva regulación de voltaje.

Como resultado de las pruebas se concluyó que la capacitancia necesaria para lograr una regulación de voltaje es de 160  $\mu\text{F}$ .

#### Calculo del flujo y el campo magnético

$$V = K * N * F * \phi$$

$$\phi = \frac{V}{K * N * F}$$

$$B = \frac{V_p * (10^4)}{K_f * N * A_c * f}$$

Tabla 1. Resultados de la regulación de voltaje en el secundario con una capacitancia de 160  $\mu\text{F}$ .

Voltaje 200 v			
Bp [T]	Fp [Wb]	Vp [V]	Ip [A]
1.2486	0.0023	100.1	14.15
1.3721	0.0025	110.0	12.33
1.5031	0.0027	120.5	9.12
1.6228	0.0029	130.1	6.35
1.7451	0.0031	139.9	5.18
Bs [T]	Fs [Wb]	Vs [V]	Is [A]
1.5156	0.0027	121.5	0
1.5854	0.0029	127.1	0
1.6365	0.0029	131.2	0
1.6690	0.0030	133.8	0
1.6989	0.0031	136.2	0
Bt [T]	Ft [Wb]	Vt [V]	It [A]
1.5803	0.0028	210.9	13.58
1.6755	0.0030	223.6	14.9
1.7721	0.0032	236.5	16.23
1.8343	0.0033	244.8	17.47
1.9055	0.0034	254.3	19.05



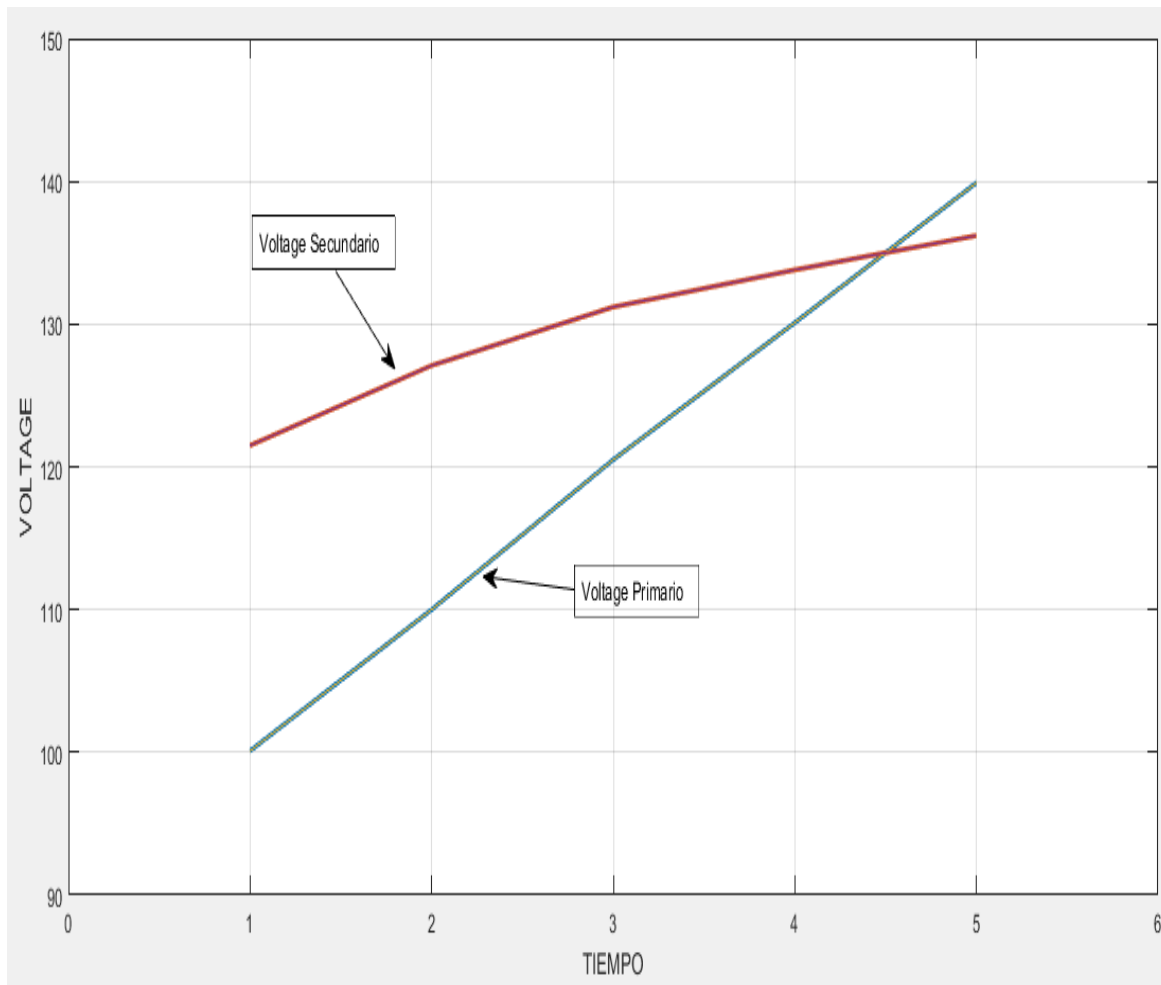


Figura 25. Comparación de las gráficas de tensión en el primario y secundario.

En relación con estos últimos datos obtenidos a partir de las pruebas con el capacitor realizamos un reajuste al diseño en el devanado secundario ya que en diseño que utilizamos es el por el método empírico el cual se emplea para transformadores que no están en saturación. Puesto que el transformador está operando bastante saturado el bobinado secundario nos da un voltaje más alto que el diseñado. En base a esta saturación se rediseña en bobinado secundario para que nos arroje el voltaje deseado.

Otra manera de visualizar la variación de voltaje es una gráfica basada del voltaje de salida y la entrada. Consecuentemente verificar la eficiencia de la regulación.

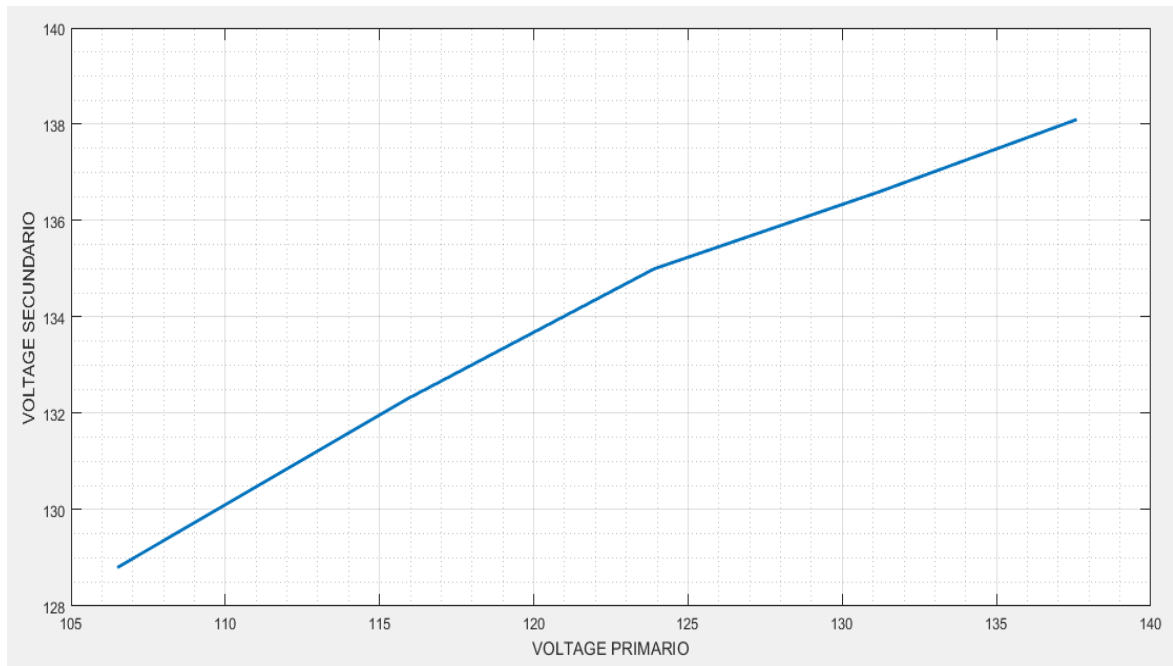


Figura 26. Tensión en el primario con respecto al secundario.

Basándonos en el flujo obtenido en las pruebas previamente hechas, podemos determinar el número de vueltas óptimo para logra la mejor regulación de voltaje deseada.

$$\phi = B * S$$

$$N_s = \frac{V_s * (10^4)}{K_f * (B * S) * f}$$

$$N_s = \frac{V_s * (10^4)}{K_f * \phi * f}$$

$$N_s = \frac{122 * (10^4)}{4.44 * 0.0030 * 60} = 153 \text{ [vueltas]}$$

$$V = K * N * F * \phi$$

$$V = 4.44 * 153 * 60 * 0.0030 = 122 \text{ [V]}$$

## Verificamos la regulación de voltaje

Máximo flujo

$$V = 4.44 * 153 * 60 * 0.0031 = 126.06 [V]$$

Mínimo flujo

$$V = 4.44 * 153 * 60 * 0.0029 = 117.8 [V]$$

Para los cálculos de la corriente se determina a partir de la capacitancia y la potencia y estos cálculos se certifican por medio de pruebas en carga del transformador.

El cálculo de la corriente en el bobinado secundaria se determina por la siguiente ecuación.

$$I_s = \frac{P_o}{V_s} [amps]$$

$$I_s = \frac{300VA}{120V} = 2.5 A [amps]$$

Corriente en el bobinado terciario

$$I_c = V * w * C [amps]$$

$$I_{c(minima)} = 210.9 * 377 * 160 \mu F [amps]$$

$$I_{c(mínima)} = 12.8 [amps]$$

$$I_{c(mínima)} = 13.6 [amps]$$

$$I_{c(maxima)} = 140V * 377 * 160 \mu F = 15.63 [amps]$$

$$I_{c(maxima \ real)} = 18.1 [amps]$$

Las diferencias en la corriente teórica respecto a la real son de 3.1 amperios en la máxima y en la mínima es de 0.8 amperios esto debido a los flujos dispersos que se producen en el transformador esto demanda más corriente de la que se calcula de manera teórica.

La corriente primaria se determina a partir de las pruebas por la cual se estableció el rango de variación de la corriente primaria.

$$I_{p(\text{mínima real})} = 5.18[\text{amps}]$$

$$I_{p(\text{máxima real})} = 14.15[\text{amps}]$$

La densidad de flujo se determina a partir de la tabla obtenida en el libro mantenimiento de máquinas eléctricas del autor Juan José manzano.

$$J = 3 [A/mm^2]$$

$$A_p = \frac{I_p}{J} [mm^2]$$

Área del conductor en milímetros cuadrados. A partir de los resultados de las corrientes obtenidas tomamos las corrientes máximas de cada bobinado para determinar su conductor.

$$A_p = \frac{14.15}{3} = 4.7[mm^2]$$

$$A_s = \frac{2.5}{3} = 0.83[mm^2]$$

$$A_c = \frac{18.1}{3} = 6.03[mm^2]$$

Selección del conductor a partir del área obtenida en el cálculo anterior.

Selección del conductor primario.

AWG 10 el cual mide  $4.9 mm^2$

Selección del conductor secundario.

AWG 17 el cual mide  $0.98 mm^2$

Selección del conductor primario.

AWG 9 el cual mide  $7.06 mm^2$

Perdidas en los conductores de los bobinados.

Resistencia sobre metros del conductor.

$$R_p = 0.003482 \left[ \frac{\Omega}{m} \right]$$

$$R_s = 0.01735 \left[ \frac{\Omega}{m} \right]$$

$$R_c = 0.002418 \left[ \frac{\Omega}{m} \right]$$

Perdidas en watts de los conductores con la corriente máxima.

$$P_p = (14.15)^2 * 0.003482 = 0.6971 [\text{watts}/m]$$

$$P_s = (2.5)^2 * 0.01735 = 0.1084 [\text{watts}/m]$$

$$P_c = (18.1)^2 * 0.002418 = 0.7921 [\text{watts}/m]$$

$$P_{cu} = 0.6971 + 0.1084 + 0.7921 = 1.5976 [\text{watts}/m]$$

Selección de fusibles.

Al momento de seleccionar los fusibles se tomó de referencia las corrientes máximas de cada bobinado de manera que bajo ninguna circunstancia allá un pico más alto de corriente y afecte el bobinado.

Acotación:

La selección del conductor no fue la misma que se determinó en el cálculo esto debido a varios factores, primero porque comercialmente en la zona donde se realizó la investigación no se encontró un conductor de cobre esmaltado mayor al número 14, otra consideración para la selección del conductor fue que el presupuesto para la investigación no fue la suficiente para cubrir esos gastos en caso de que se consiguiera el conductor calculado y por último debido a las características del conductor calculado no tendría espacio en la ventana del transformador lo cual complicaría la construcción de dicho transformador.

Ya que debido a que se seleccionó un conductor más pequeño del que se necesita para el bobinado del transformador se determinó el tiempo a máxima corriente en los bobinados y de esta manera determinar temperatura en el bobinado y establecer un tiempo de operación antes de alcanzar la temperatura máxima y de esta manera evitar que ocurra un cortocircuito en el bobinado del transformador.

Estas consideraciones finales son debido a las complicaciones que ocurrieron en el desarrollo del proyecto, pero por sobre todo la falta de presupuesto.

## 5. Validar el acondicionamiento del voltaje realizado por el transformador ferroresonante.

Para validar el correcto funcionamiento del transformador ferroresonante y que efectivamente regule el voltaje hacia la carga. Se realizará las pruebas en vacío y con carga. Posteriormente tomar evidencia de la regulación de voltaje respecto a las variaciones de voltaje que pueden ocurrir en las líneas de distribución.

Como abemos el transformador ferroresonante consta de tres devanados uno para la fuente que es primario el segundo para la carga y el terciario que sería para la capacitancia del transformador.

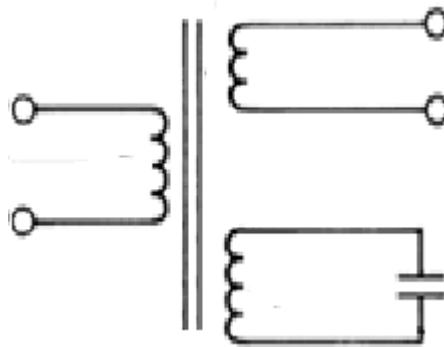


Figura 27. Esquema de conexión del transformador básico ferroresonante.

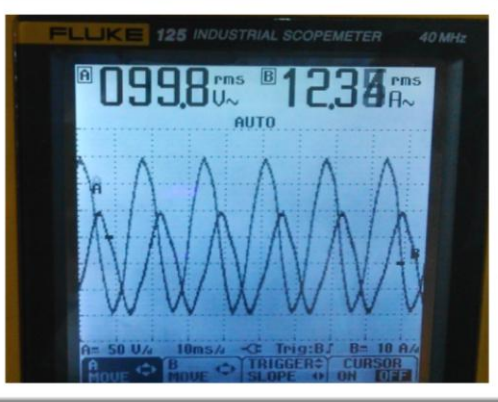

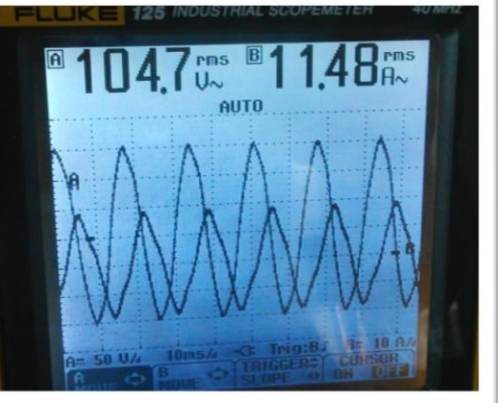

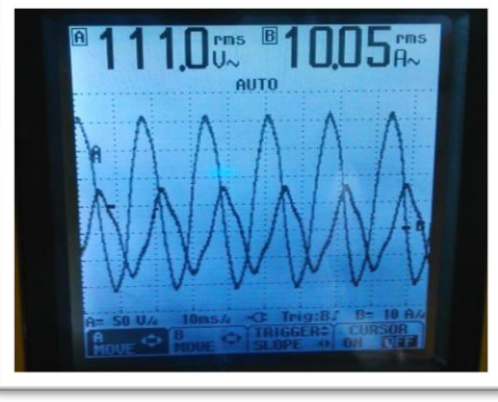

Al momento de realizar las pruebas se dispuso del transformador ferroresonante y de los equipos de medición disponibles en la oficina de investigación estos son los medidores fluke que nos ayudan a evidenciar la regulación de voltaje.



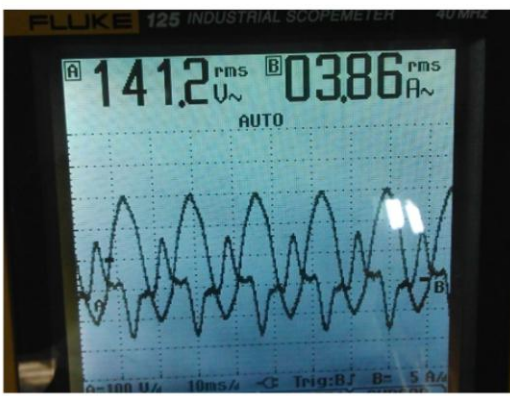
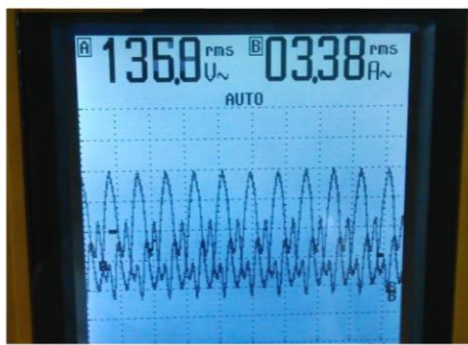
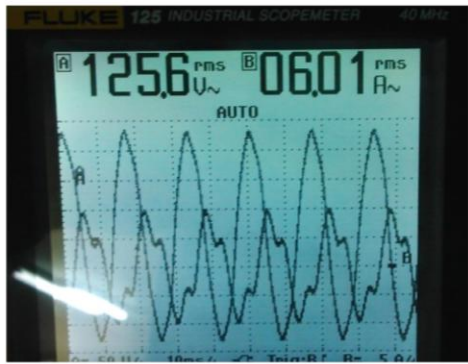
Figura 28. Conexión del transformador básico ferroresonante de acuerdo al esquema anterior.

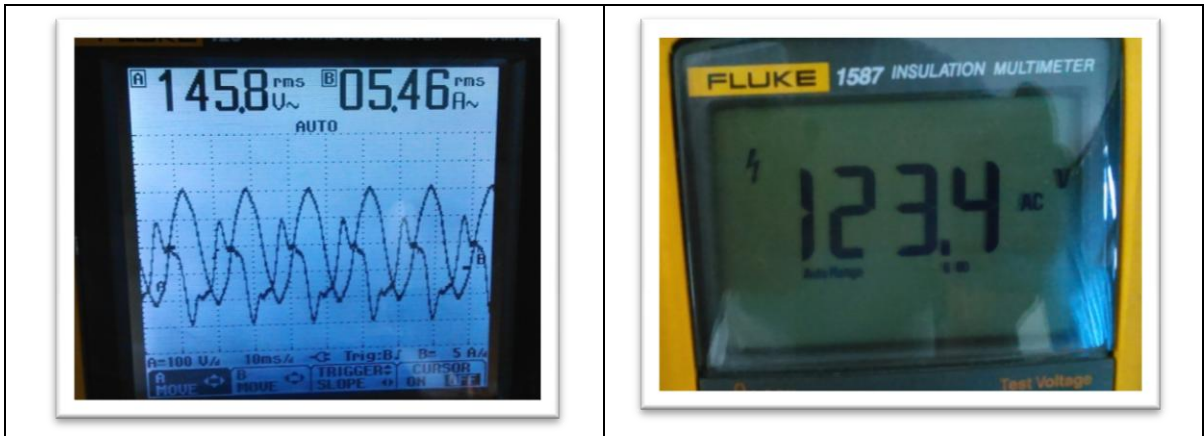
Evidencias de la prueba de vacío del transformador ferresonante básico. En el cual certificaremos la correcta regulación en el voltaje de salida hacia la carga a partir de la variación de voltaje en el primario.

Tabla 2. Resultados de la regulación de voltaje en el bobinado secundario a partir de variaciones en el primario en vacío.

Voltaje de Entrada	Voltaje de Salida
 <p>Fluke 125 Industrial Scopemeter display showing 099.8 Vrms and 12.38 Arms. The screen displays a sine wave graph and technical specifications: Am 50 U/V, 10ms/div, Trig: B, B= 10 A/V.</p>	 <p>Fluke 1587 Insulation Multimeter display showing 111.8 AC. The screen displays a lightning bolt icon and 'Auto Range'.</p>
 <p>Fluke 125 Industrial Scopemeter display showing 104.7 Vrms and 11.48 Arms. The screen displays a sine wave graph and technical specifications: Am 50 U/V, 10ms/div, Trig: B, B= 10 A/V.</p>	 <p>Fluke 1587 Insulation Multimeter display showing 113.7 AC. The screen displays a lightning bolt icon and 'Auto Range'.</p>
 <p>Fluke 125 Industrial Scopemeter display showing 111.0 Vrms and 10.05 Arms. The screen displays a sine wave graph and technical specifications: Am 50 U/V, 10ms/div, Trig: B, B= 10 A/V.</p>	 <p>Fluke 1587 Insulation Multimeter display showing 115.8 AC. The screen displays a lightning bolt icon and 'Auto Range'.</p>







Luego de realizar todas las pruebas mecerías para evidenciar el correcto funcionamiento del transformador ferresonante básico. Podemos concluir que en vacío tiene una efectiva regulación. Y cumple con el objetivo de la investigación la cual es el acondicionar del voltaje.

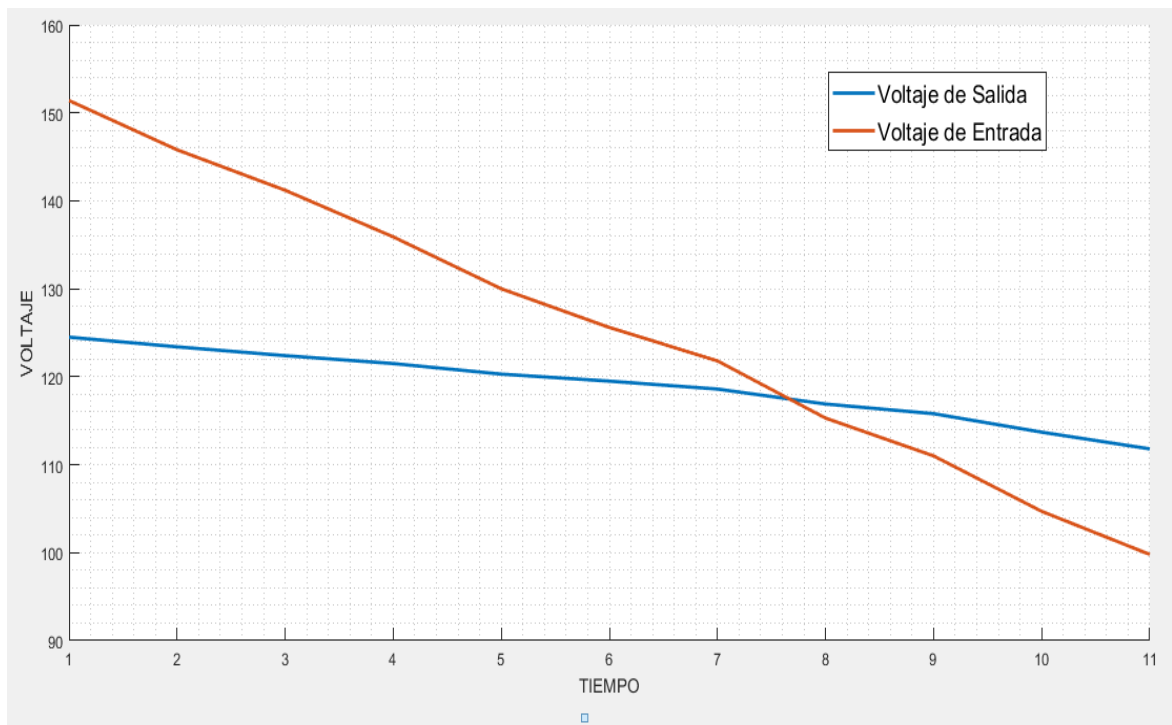

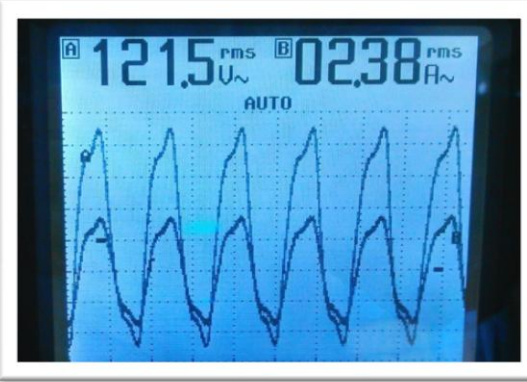

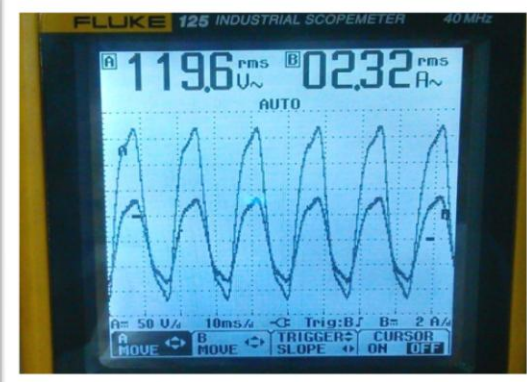


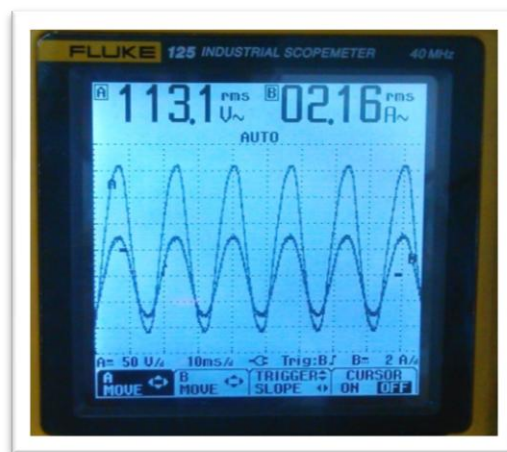
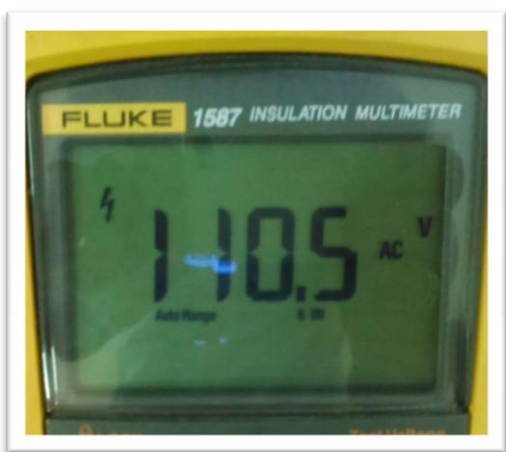
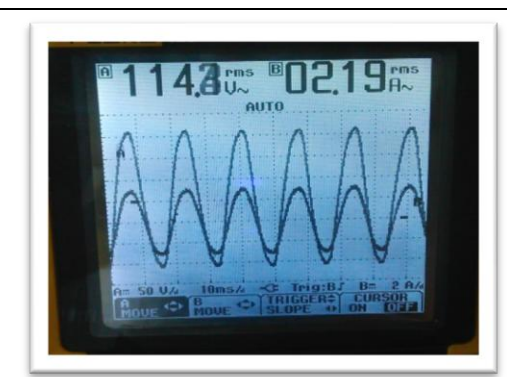
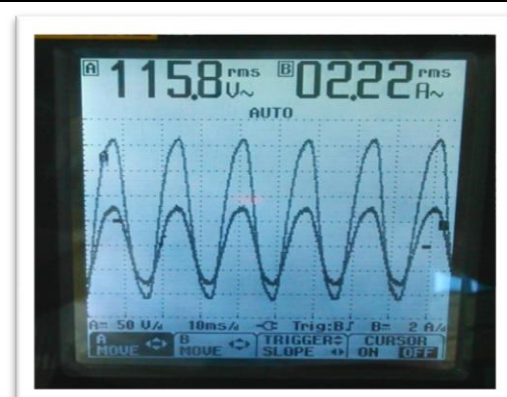
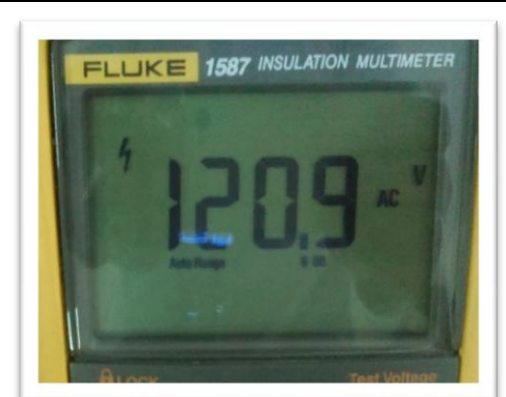
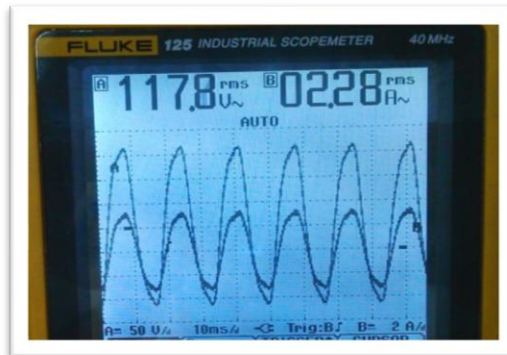
Figura 29. Grafica donde se evidencia la regulación del transformador básico ferresonante en vacío. Fuente Autor.

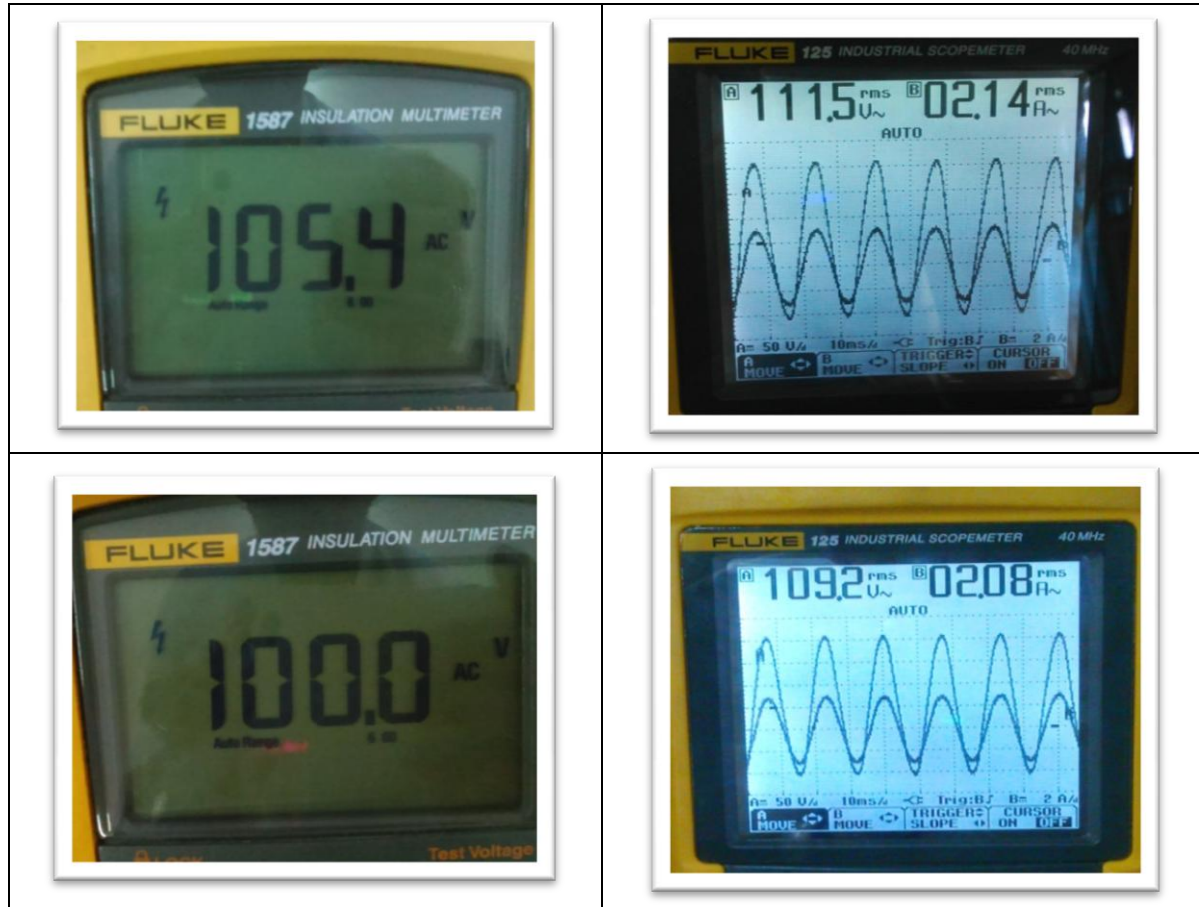
Al graficar los puntos de cada una de las pruebas realizadas podemos apreciar de una mejor manera la regulación de voltaje de entrada respecto a la salida. Se puede certificar que efectivamente se está utilizando el en transformador ferresonante básico como un equipo acondicionador del voltaje.

A continuación, se mostrarán los resultados de las pruebas del transformador ferresonante conectado a una carga de 2 amperios.

Tabla 3. Resultados de la regulación de voltaje en el bobinado secundario a partir de variaciones en el primario con carga.

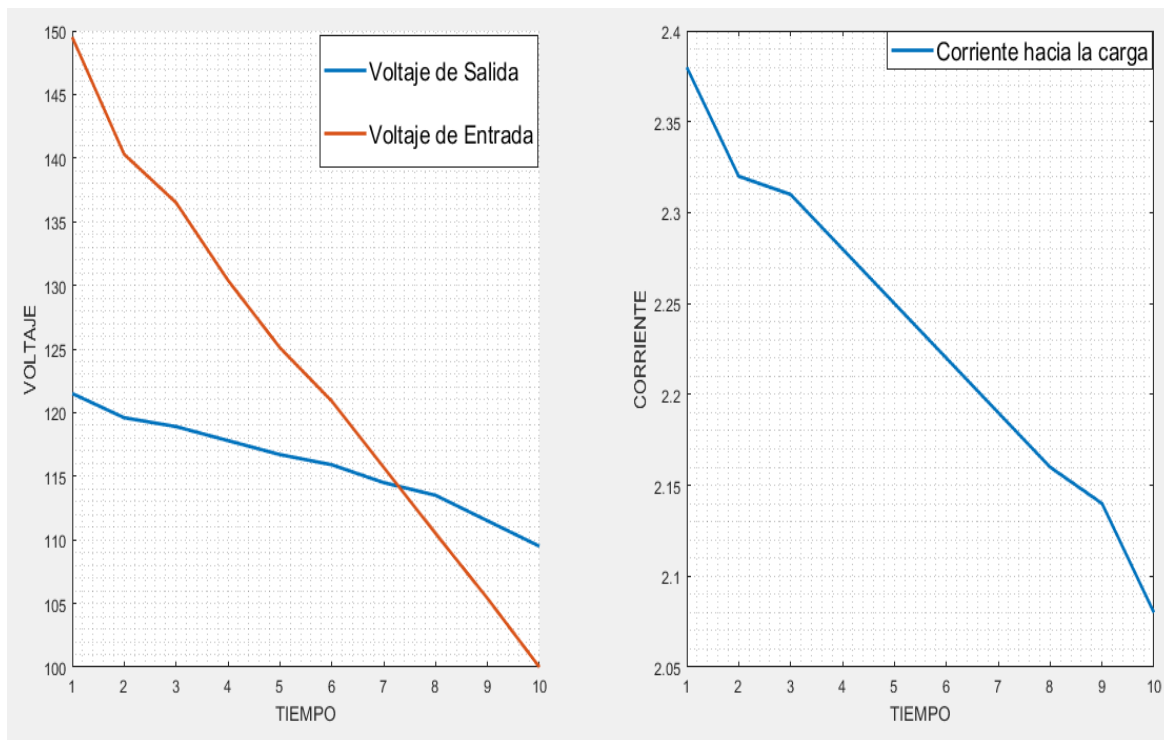
Voltaje de Entrada	Voltaje de Salida
 <p>FLUKE 1587 INSULATION MULTIMETER 149.5 V<sub>AC</sub></p>	 <p>FLUKE 125 INDUSTRIAL SCOPEMETER 40 MHz A 121.5<sub>rms</sub> V<sub>AC</sub> B 02.38<sub>rms</sub> A<sub>AC</sub> AUTO</p>
 <p>FLUKE 1587 INSULATION MULTIMETER 140.3 V<sub>AC</sub></p>	 <p>FLUKE 125 INDUSTRIAL SCOPEMETER 40 MHz A 119.6<sub>rms</sub> V<sub>AC</sub> B 02.32<sub>rms</sub> A<sub>AC</sub> AUTO A= 50 V/div 10ms/div Trig: B J B= 2 A/div A MOVE B MOVE TRIGGERS CURSOR SLOPE ON</p>





Por medio de estas pruebas pudimos evidenciar que la regulación es efectiva y se cumplen los objetivos del transformador ferresonante el cual es regular el voltaje a pesar de variación de voltaje en la salida hacia la carga.

Cabe mencionar que se realizaron muchas más pruebas para tener más datos y platearlos en una gráfica donde me evidencie lo mejor posible la regulación de voltaje realizada por el transformador ferresonante.



*Figura 30. Grafica donde se evidencia la regulación del transformador básico ferroresonante con una carga constante de dos amperios.*

Al graficar los puntos de cada una de las pruebas realizadas podemos apreciar de una mejor manera la regulación de voltaje de entrada respecto a la salida. Se puede certificar que efectivamente se está utilizando el en transformador ferroresonante básico como un equipo acondicionador del voltaje el cual también cumple con la demanda de corriente hacia la carga con una mínima variación de tensión y de corriente la cual afecta en lo más mínimo a la carga.

Este transformador básico ferroresonante es el más sencillo de los diseños de los transformadores ferroresonantes, estos se pueden mejorar aumentando su eficiencia principalmente mejorando su núcleo el cual no es el más óptimo para este dispositivo. Ya que a pesar que tiene un buen funcionamiento tiene una gran pérdida en las corrientes y por consiguiente un significativo problema de aumento de temperatura.

Normativa CENS.

Para certificar el correcto funcionamiento del transformador ferroresonante y que si cumple con las regulaciones establecidas se apoyó en la norma CENS en el tomo 1 capítulo 2 de la tabla 3 donde se establece que el suministro desde transformadores de distribución para uso exclusivo del cliente donde la norma establece que la tolerancia de la tensión nominal en voltios.

<b>TIPO DE CONEXIÓN</b>	<b>FASES</b>	<b>TENSIÓN NOMINAL EN VOLTIOS (V) TOLERANCIA (±10%)</b>
Monofásico trifilar (bifásico)	FFN	120 / 240 V
Trifásico tetrafilar	FFFN	127 / 220 V
Trifásico tetrafilar	FFFN	254 / 440 V
Trifásico tetrafilar	FFFN	277 / 480 V
Cualquier otro tipo de conexión o tensión nominal quedará supeditado a aprobación por parte de CENS.		

Tabla 2. Tolerancia de tensión nominal uso exclusivo del cliente. (CENS, 2017).

En referencia a la clasificación anterior se pudo validar que el porcentaje entregado hacia la carga a partir de la regulación de voltaje realizada por el transformador ferroresonante a partir de unas variaciones en la entrada considerablemente grandes.

Ya que la carga recibe una variación de tensión de más o menos el 5%o 6% mientras que a la entrada del regulador entran voltajes con una variación del más o menos el 20% la cual afectaría gravemente los equipo y en especial los equipos sensibles a l variación de tensión que incluso la norma CENS no permite este tipo de variaciones en la red. Pero de todas maneras las redes están expuestas a sufrir una falla de cualquier índole y provocar este tipo de perturbaciones en la red eléctrica.

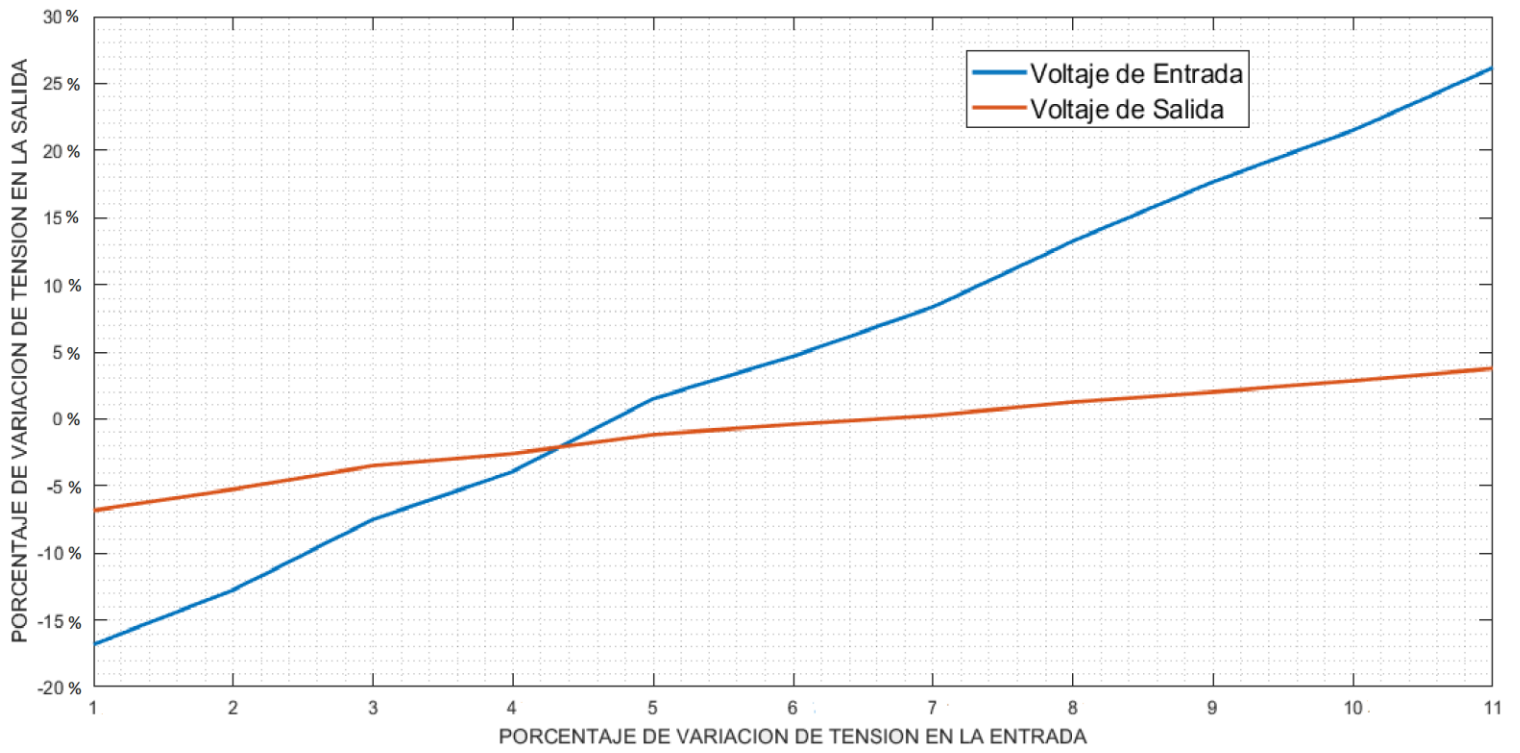


Figura 31. Porcentaje de tolerancia de variación de tensión. Fuente Autor.



## 6. Conclusiones

En este proyecto se hizo un estudio de la ferresonancia como en equipo acondicionador del voltaje, estos estudios se basaron en simulaciones en el programa de Matlab simulink, en cálculos para el diseño del transformador y pruebas de laboratorio.

Debido a la gran dificultad que tiene el estudio de la ferresonancia y la poca información referente a la ferresonancia como equipo acondicionador del voltaje se trató de llegar al diseño más óptimo basándose en los pocos parámetros de diseño encontrados, también en las simulaciones y por último afianzándonos con las pruebas prácticas realizadas en el laboratorio de máquinas eléctricas.

La ferresonancia es un tema muy amplio y como dirían, con mucha tela por cortar sería recomendable seguir esta línea de investigación ya que se puede mejorar mucho la eficiencia del regulador de voltaje y también agregar algunas otras mejoras sobre la calidad de la energía.

Otro punto a tener en cuenta y es muy importante para futuros diseños es en el diseño y construcción donde para poder optimizar el transformador ferresonante sería mejor conseguir o buscar la chapa especializada para este tipo de aplicación donde el núcleo varía su tamaño de un devanado a otro minimizando el flujo necesario para lograr que el transformador trabaje en saturación y al mismo tiempo disminuyendo la corriente de operación del transformador y los flujos dispersos.

De esta forma logra un regulador ferresonante que calienta mucho menos, tiene menos pérdidas y menos ruido. Logrando una mejor efectividad en el regulador de voltaje. Entre muchas otras cosas que se pueden aportar para el mejoramiento de este equipo.

## 7. Bibliografía

- (R2007), I. S.-1. (25 de 07 de 2017). *IEEE Standard for Ferroresonant Voltage Regulators*. Obtenido de <http://ieeexplore.ieee.org/document/789958/>
- Eduardo José Toledo, M. O. (s.f.). Análisis de Ferroresonancia en Transformadores. 5.
- FERRACCI, P. (22 de 07 de 2017). *Ferroresonance*. Obtenido de Cahier technique n° 190: [http://www.studiecd.dk/cahiers\\_techniques/Ferroresonance.pdf](http://www.studiecd.dk/cahiers_techniques/Ferroresonance.pdf)
- inc, e. c. (27 de 07 de 2017). *ferroresonant transformers*. Obtenido de [http://www.electroncoil.com/ferroresonant\\_transformers.php](http://www.electroncoil.com/ferroresonant_transformers.php)
- Lobo, L. M. (27 de 07 de 2017). *Estudio de sobretensiones por fenómeno de ferroresonancia*. Obtenido de Universidad de Costa Rica: [http://eie.ucr.ac.cr/uploads/file/proybach/pb2012/pb2012\\_048.pdf](http://eie.ucr.ac.cr/uploads/file/proybach/pb2012/pb2012_048.pdf)
- MCLYMAN, C. W. (3 edition (February 18, 2009)). *TRANSFORMER AND INDUCTOR DESIGN HANDBOOK*. Kg Magnetics, Inc. Idyllwild, California, U.S.A.
- perfec, U. p. (22 de 07 de 2017). *Constant Voltage Transformer Operation*. Obtenido de <https://www.ustpower.com/comparing-automatic-voltage-regulation-technologies/avr-guide-ferroresonant-transformer-type-voltage-regulator/avr-guide-constant-voltage-transformer-operation/>
- perfect., p. m. (26 de 07 de 2017). *www.ustpower.com*. Obtenido de AVR Guide: Ferroresonant Transformer Advantages & Disadvantages: <https://www.ustpower.com/comparing-automatic-voltage-regulation-technologies/avr-guide-ferroresonant-transformer-type-voltage-regulator/avr-guide-ferroresonant-transformer-advantages-disadvantages/>
- Pouria G. Khorasani, A. D. (23 de 07 de 2017). *A New Modeling of Matlab Transformer for Accurate Simulation of Ferroresonance*. Obtenido de IEEE Xplore digital library: <http://ieeexplore.ieee.org/document/4915249/>
- Ray-Lee Lin, C.-H. T.-C. (20 de 07 de 2017). *Design and Implementation of Ferroresonant Transformer for LED Driver Systems*. Obtenido de IEEE Xplore digital library: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7731891/>
- Romero, L. F. (27 de 07 de 2017). *UNIVERSIDAD NACIONAL DE ASUNCIÓN PARAGUAY*. Obtenido de Estudio de un Sistema Ferroresonante Mediante Teorías de bifurcación: [http://www.cc.pol.una.py/~cschaer/Libro%20Final%20Luis%20Salgueiro%20\(1\).pdf](http://www.cc.pol.una.py/~cschaer/Libro%20Final%20Luis%20Salgueiro%20(1).pdf)
- Sergio R. Sagardia. (1997). potential transformaer failure due to ferroresonance. 6.

Torres, S. (2017). *Análisis de Ferroresonancia y Técnicas de Mitigación en Transformadores de Distribución*.