

GRADO EN INGENIERÍA EN
TECNOLOGÍA INDUSTRIAL

TRABAJO DE FIN DE GRADO

***DISEÑO DE UN CIRCUITO DE SUPRESIÓN
DE LA FERRORESONANCIA NO LINEAL***

Alumno: Berdugo López, Adrián

Director: Valverde Santiago, Víctor

Curso: 2017-2018

Fecha: 10 / 07 / 2018

Título del trabajo: Diseño de un circuito de supresión de la ferorrresonancia no lineal.

Resumen: El objetivo principal de este trabajo es diseñar un circuito de amortiguamiento en base a una inductancia no lineal, para reducir el efecto de la ferorrresonancia producida en transformadores de tensión. Dicho circuito se modelizará con la herramienta software Matlab.

Palabras clave: Diseño, amortiguamiento, inductancia no lineal, ferorrresonancia, transformador de tensión, Matlab.

Izenburua: Ferrorresonantzia ez linealeko motelketa zirkuitu baten diseinua.

Laburpena: Proiektu honetan moteltze zirkuitu bat eraiki da, induktantzia ez linealean oinarrituta. Honen helburua tentsio transformadoreen ondorioz sortutako ferorrresonantziaren efektua txikitzea da. Zirkuito hau Matlab softwarearekin laguntzarekin egin da.

Hitzgakoak: Disenua, motelketa, induktantzia ez lineala, ferorrresonantzia, tentsio transformadorea, Matlab.

Title: Design of a non linear suppressed ferroresonant circuit.

Abstract: The main objective of this work is to design a suppressed circuit based on a non-linear inductance circuit, to reduce the effect of ferroresonance in voltage transformers. This circuit will be modeled with the software Matlab.

Keywords: Design, suppression, non-linear inductance, ferroresonance , voltage transformer, Matlab.

ÍNDICE

1. Introducción	8
2. Contexto	9
2.1. Sistema eléctrico de potencia (SEP)	9
2.2 Transformadores y sus problemas	10
3. Objetivo y alcance	11
4. Beneficios del proyecto	12
4.1 Beneficios técnicos	12
4.2 Beneficios económicos	12
4.3 Beneficios sociales	13
5. Estado del arte	14
5.1 Transformadores de tensión	14
5.2 Ferorrresonancia	15
5.2.1 Origen y definición	15
5.2.2 Clasificación	16
5.2.3 Causas y efectos	18
5.3 Ferorrresonancia en un circuito LC serie no lineal	19
5.3.1 Concepto de inductancia no lineal	19
5.3.2 Cálculo gráfico del punto de operación	21
5.4 Circuito de supresión	24
6. Análisis de las alternativas	27
6.1 Métodos de análisis para el estudio de transformadores de tensión	27
6.1.1 Identificación de las alternativas	27
6.1.2 Definición de los criterios de selección	28
6.1.3 Selección de la solución	28
6.2 Elección de la herramienta software	29
6.2.1 Identificación de las alternativas	30
6.2.2 Definición de los criterios de selección	30
6.2.3 Selección de la solución	31
7. Descripción de la solución	33
7.1 Montaje base	33

7.1.1 Fuente de tensión	33
7.1.2 Transformador de tensión	34
7.1.3 Condensador	38
7.2 Circuitos de supresión de la ferorresonancia.....	39
7.2.1 Conexión con interruptor.....	40
7.2.2 Conexión con interruptor magnético	40
8. Metodología.....	42
8.1 Análisis del montaje base.....	42
8.2 Análisis de la inductancia no lineal y resistencia de amortiguación.....	43
8.2.1 Elección de la resistencia.....	44
8.2.2 Elección de la inductancia no lineal	46
9. Descripción de tareas. Gantt	52
10. Desglose de gastos.....	55
10.1 Horas internas	55
10.2 Amortizaciones.....	55
10.3 Gastos	56
10.4 Subcontrataciones	56
10.5 Desglose total.....	56
11. Conclusiones.....	57
12. Referencias / Bibliografía	58
13. Anexos.....	60
13.1 Anexo I. Normativa aplicable.....	60
13.2 Anexo II. Planos de conjunto. Esquemas	61
13.2.1 Simulación de curvas de saturación de inductancia no lineal y transformador	61
13.3 Anexo III. Código	65

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Sistema eléctrico de potencia.....	9
Figura 2. Transformador de potencia	10
Figura 3. Transformadores de tensión	14
Figura 4. Ferrorresonancia Fundamental [5].....	16
Figura 5. Ferrorresonancia Subarmónica [5]	17
Figura 6. Ferrorresonancia Casi-Periódica [5].....	17
Figura 7. Ferrorresonancia Caótica [5]	18
Figura 8. Circuito serie ferorresonante	19
Figura 9. Curva de magnetización de un material ferromagnético.....	20
Figura 10. Curva de magnetización del aire	20
Figura 11. Descomposición de la curva de saturación.....	21
Figura 12. Obtención de los posibles puntos de operación de un circuito ferorresonante serie.....	22
Figura 13. Tensiones de los puntos de operación del circuito no lineal	23
Figura 14. Circuito de amortiguamiento en el triángulo abierto formado por los devanados secundarios.	24
Figura 15. Fuente de tensión.....	33
Figura 16. Inductancia no lineal	34
Figura 17. Composición de la inductancia no lineal.....	34
Figura 18. Detalle de la curva de saturación.....	36
Figura 19. Composición del transformador de tensión.....	36
Figura 20. Composición del transformador de tensión con instrumentos de medida....	37
Figura 21. Curva de saturación del transformador.....	38
Figura 22. Conjunto fuente, condensador y transformador conectados.....	38
Figura 23. Tensión e intensidad de circuito ferorresonante	39
Figura 24. Situación de conexión con interruptor común.....	40
Figura 25. Situación de conexión con interruptor magnético	41
Figura 26. Montaje para hallar la curva de saturación.	42
Figura 27. Curva de saturación del transformador.....	43
Figura 28. Conexión con interruptor.....	44
Figura 29. Tensión V_2 con 80Ω	44
Figura 30. Tensión V_2 con 210Ω	45

Figura 31. Tensión V2 con 200 Ω	45
Figura 32. Conexión con interruptor magnético.	46
Figura 33. Tensión V2 con 0,05 H.....	47
Figura 34. Tensión V2 con 0,01 H.....	47
Figura 35. Tensión V2 con 0,025 H.....	48
Figura 36. Tensión máxima V2 con 0,025 H.....	48
Figura 37. Comparación de intensidades según la inductancia.	48
Figura 38. Comparación de curvas de saturación.....	49
Figura 39. Circuitos de supresión.	50
Figura 40. Comparación de tensiones máximas entre circuitos de supresión.	51
Figura 41. Diagrama Gantt.....	54

Anexo

Figura A 1. Mediciones de inductancia en Simulink.	61
Figura A 2. Valores de la inductancia.	61
Figura A 3. Programación de bloques de la inductancia.....	62
Figura A 4. Valores de Intensidad y flujo de la inductancia.....	63
Figura A 5. Mediciones de transformador en Simulink.....	63
Figura A 6. Distribución Simulink del transformador.....	64
Figura A 7. Valor de los elementos del transformador.....	64
Figura A 8. Circuitos de supresión.....	64
Figura A 9. Valores de la inductancia no lineal.....	64
Figura A 10. Código de la curva de saturación de la inductancia de los transformadores.....	65
Figura A 11. Código para visualizar las curvas de saturación de transformador e inductancia.	66

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Selección del método de análisis	29
Tabla 2. Valoración de la herramienta software	31
Tabla 3. Valores de intensidad y flujo de la inductancia no lineal	35
Tabla 4. Valores de los elementos del transformador	37
Tabla 6. Lista de reuniones e hitos.....	53
Tabla 7. Desglose: Horas internas	55
Tabla 8. Desglose: Amortizaciones	55
Tabla 9. Desglose: Gastos.....	56
Tabla 10. Desglose: Total	56

1. Introducción

Este documento contiene el Trabajo de Fin de Grado (TFG) nombrado como “Diseño de un circuito de supresión de la ferorrresonancia no lineal”. En una primera parte se presenta el contexto del trabajo, así como el objetivo y alcance del mismo y los objetivos (técnicos, económicos y sociales) que se esperan conseguir con la realización de este TFG.

Después de lo anteriormente mencionado, se incluye un estado del arte. En éste se realiza una breve explicación sobre el tipo de transformador con el que se va a trabajar, se explica lo que es la ferorrresonancia y se comentan sus orígenes, causas y efectos. Por último, se plantea de forma genérica que aspectos se deben considerar para crear un circuito de supresión.

Una vez finalizado el apartado anterior, se presenta un análisis de las alternativas existentes para los métodos de estudio de la ferorrresonancia que se da en el transformador y para la elección de la herramienta software a utilizar para modelar el sistema, valorando las diferentes opciones mediante diferentes criterios para justificar la opción escogida.

Posteriormente, se realiza una descripción de la solución adoptada y se explican brevemente sus componentes principales. Con esto, queda definido tanto el modelo con el que se trabaja como los parámetros utilizados para llevar a cabo una correcta simulación.

Tras realizar la descripción de la solución, se verifica en la metodología el modelo definido en el apartado anterior. Para lograrlo, se realizan simulaciones en varias circunstancias, las cuales también se muestran y explican en este apartado.

Este TFG también cuenta con un desglose de gastos realizado de una manera genérica, que incluye la inversión necesaria para la realización del proyecto y una planificación Gantt; en la que se exponen diferentes etapas del proyecto y se marcan diferentes hitos.

Por último, este documento incluye un apartado de conclusiones en el que a modo de resumen, en concordancia con los resultados obtenidos en base a las pruebas y simulaciones realizados, engloba la información fundamental de este TFG.

2. Contexto

2.1. Sistema eléctrico de potencia (SEP)

El sistema eléctrico de potencia es el conjunto de equipos e instalaciones que permiten el uso de la energía eléctrica a gran escala. Se compone fundamentalmente de la generación, el transporte, la distribución y el consumo. En cada una de estas etapas el nivel de tensión es diferente, por lo que es necesaria la utilización de transformadores para lograr la interconexión de cada una de las partes que componen el SEP. Pese a esto, todas conforman un sistema trifásico de frecuencia constante, siendo esta 50Hz en Europa y 60Hz en América.

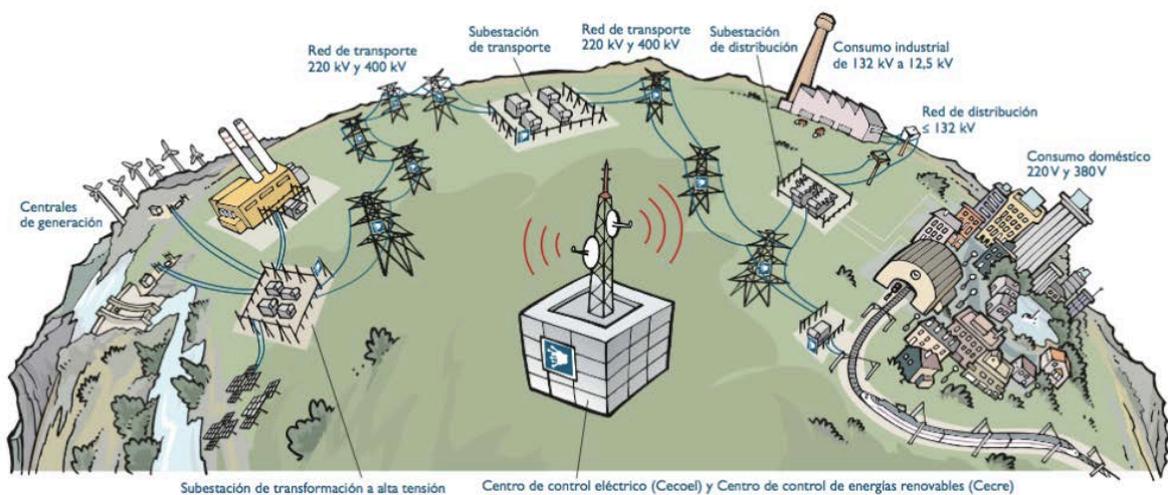


Figura 1. Sistema eléctrico de potencia

Debido a la incapacidad de almacenar grandes cantidades de energía eléctrica a un precio razonable, el consumo debe ser igual a la generación en todo momento por lo que se debe controlar en la medida de lo posible y con rapidez cualquier alteración que se produzca en el suministro eléctrico. La variación de la demanda producida por diversos factores (hora del día, estación, climatología, etc.) es el origen de estas alteraciones que generan problemas electromagnéticos no deseados.

En conclusión, el SEP convierte diversas formas de energía en energía eléctrica, la transporta y la distribuye hasta centros de consumo y allí se transforma en una energía más apta para su consumo. Todo esto debe realizarse a un nivel de tensión óptimo para cada etapa, asegurando así un nivel de calidad en el suministro.

[1]

2.2 Transformadores y sus problemas

Un transformador es un dispositivo eléctrico que permite aumentar o disminuir la tensión en un circuito eléctrico de corriente alterna, basándose en el fenómeno de la inducción electromagnética. Está constituido por dos bobinas de material conductor, devanadas sobre un núcleo de material ferromagnético, aunque están aisladas entre si eléctricamente. Las bobinas o devanados son llamados primario y secundario según correspondan a la entrada o la salida del sistema.



Figura 2. Transformador de potencia

Pese a que los transformadores sean elementos muy eficaces y eficientes, cuando su núcleo entra en saturación, puede dar problemas al sistema o también sufrir daños en su propio aislamiento. Son este tipo de condiciones de funcionamiento las que hacen que se produzcan diversos fenómenos (como es el caso de la ferorrresonancia) que pueden generar efectos negativos en el sistema (sobretensiones, sobreintensidades, sobrecalentamiento de material,...) si no son detectados y controlados a tiempo.

Mediante herramientas software se puede modelizar el comportamiento de un transformador, lo que será útil, ya que de este modo es posible realizar pruebas de campo y análisis de diferentes comportamientos que puede tener un transformador sin necesidad de recurrir a uno real; siendo la opción simulada más viable económicamente y técnicamente.

3. Objetivo y alcance

El objetivo principal de este trabajo es diseñar un circuito de amortiguamiento en base a una inductancia no lineal, para reducir el efecto de la ferorrresonancia producida en transformadores de tensión. Para ello es necesario la herramienta software Matlab, siendo ésta la encargada de modelizar todo el sistema requerido para cumplir este objetivo.

Para lograrlo, se deben tener en cuenta otro tipo de objetivos previos que es necesario comentar:

- Repasar los conceptos generales de un transformador.
- Realizar una búsqueda bibliográfica sobre el fenómeno de la ferorrresonancia.
- Realizar un análisis de los diferentes circuitos de supresión de la ferorrresonancia.
- Modelizar mediante la herramienta Matlab un transformador de tensión ferorrresonante.
- Realizar el diseño del circuito de amortiguamiento no lineal.
- Comprobar la validez del modelo en diferentes circunstancias.

Una vez evaluado el comportamiento del modelo en diferentes situaciones, se comparan los resultados obtenidos en dichas simulaciones con el objetivo de observar y demostrar cuál de los tipos de circuito de amortiguación es el más óptimo.

El alcance de este trabajo será de ayuda para otros futuros objetivos como los siguientes:

- Los resultados obtenidos en el trabajo pueden utilizarse para observar la forma que tienen las señales (tensión, intensidad y flujo) en estado de ferorrresonancia y en estado de ferorrresonancia amortiguada.
- Las conclusiones del trabajo ayudan a localizar de forma eficaz los posibles efectos perjudiciales de la ferorrresonancia además de suprimir de manera óptima los efectos que ésta produce a lo largo del tiempo.
- Obtener una herramienta software capaz de representar la posibilidad de entrar en ferorrresonancia de un transformador, pudiendo observar los diferentes valores de las señales del transformador sin la necesidad de poner en riesgo uno durante un ensayo de laboratorio o la continuidad de la demanda eléctrica durante pruebas.

4. Beneficios del proyecto

Los beneficios que aporta este trabajo son clasificables en tres subapartados: técnicos, económicos y sociales. Debido al carácter de este trabajo, los de mayor importancia serán los técnicos y tanto los beneficios económicos como los sociales derivarán de éste.

4.1 Beneficios técnicos

En el SEP (Sistema Eléctrico de Potencia), la generación de la energía debe estar siempre lo más igualada posible a la demanda de la misma; pero no es tarea fácil ya que la demanda cambia de forma notable según diversos factores que han de tenerse en cuenta. La empresa encargada de realizar la tarea de cubrir la demanda de la energía con diferentes empresas generadoras es la REE (Red Eléctrica Española), y debe hacerlo previendo la demanda que habrá en los días posteriores.

El cambio de las condiciones de funcionamiento hace aparecer transitorios electromagnéticos que pueden causar que la energía que se esté suministrando no sea de la calidad requerida o que haya averías en diferentes aparatos eléctricos. Es por esto que se debe tratar de evitar que se produzcan estos transitorios electromagnéticos.

Al conocer el comportamiento del transformador hacia estos cambios de funcionamiento de antemano gracias al modelo software que se plantea, se pueden prever las consecuencias negativas que podrán aparecer en él, mejorando así la integridad del propio transformador y la de los equipos conectados a la red. De estos beneficios derivarán los beneficios económicos y sociales.

4.2 Beneficios económicos

Tener el transformador modelizado mediante herramientas de simulación ayuda a no tener que realizar los ensayos en un modelo real, lo cual se traduce en un ahorro en material y en personal necesario.

Además, de producirse cualquier problema en los ensayos en una máquina real, estos problemas podrían afectar a otras máquinas o a la propia red; con lo que tener modelizado el transformador sirve para evitar toda esa clase de problemas que

suponen un gran costo económico, o incluso prever la aparición de esos problemas; evitando así deterioros y envejecimiento en las máquinas.

También cabe destacar que, además de los beneficios económicos que se obtienen al evitar o retrasar sustituciones de los elementos del SEP, se obtienen beneficios al mejorar la calidad del suministro eléctrico. Ya que se conoce el comportamiento de los elementos del circuito, se puede asegurar que se cumplen las características requeridas de tensión, frecuencia, armónicos, etc., trabajando de este modo en las condiciones eléctricas óptimas.

4.3 Beneficios sociales

El número de usuarios conectados a la red es cada vez mayor, como también lo es el número de dispositivos eléctricos que se conectan. Es por esto que la demanda de energía eléctrica también aumenta, requiriendo un servicio de mayor calidad. Conocer la respuesta de la red facilita el conocimiento de las condiciones a las que deben verse sometidos los transformadores para evitar en la medida de lo posible efectos negativos que generen fallos en el SEP.

Con este proyecto se podrá ayudar a crear esa red de mayor seguridad y calidad que permita evitar los diferentes problemas eléctricos que puedan surgir o, en el caso de no ser posible, ayuden a minimizar los efectos de esos problemas. Esta mejora de la red de distribución repercute directamente sobre los clientes y sobre los dispositivos que tengan conectados.

5. Estado del arte

En este apartado, se realizará una introducción explicando diferentes aspectos generales de los transformadores de tensión para comprender mejor lo que en este documento se va a presentar.

Posteriormente se describirá el fenómeno de la ferorrresonancia, indicando las causas de su aparición, los efectos que produce y comentando a rasgos generales de que formas puede aparecer este fenómeno.

Por último, se expondrá información sobre un circuito de supresión válido para atenuar en la medida de lo posible los efectos de la ferorrresonancia.

5.1 Transformadores de tensión

Los transformadores de tensión son dispositivos que permiten aumentar o disminuir la tensión según sea necesario en la instalación eléctrica en la que se conecten. Este circuito debe ser de corriente alterna, ya que el funcionamiento de estos transformadores se basa en el fenómeno de la inducción electromagnética [2]. Además, este tipo de transformador permite una variación de la tensión manteniendo su potencia constante (en los casos no ideales se generarán pérdidas).



Figura 3. Transformadores de tensión

Entre los tipos de transformadores que existen, se estudiará el fenómeno de la ferorrresonancia en los transformadores de tensión, ya que es un fenómeno que no se da en los transformadores de intensidad, al no tener inductancias saturables. Los transformadores de tensión son susceptibles a la ferorrresonancia, ya que se comportan de manera no lineal y están diseñados para que trabajen en condiciones parecidas a las de vacío. Este tipo de transformadores tienen como función básica separar el circuito de alta tensión de instrumentos que trabajan a tensiones menores tales como protecciones, contadores, instrumentos de medida, relés, etc.

Dentro de los transformadores de tensión cabe destacar la distinción entre transformadores de tensión capacitivos y transformadores de tensión inductivos.

La diferencia entre ambos tipos es que el capacitivo tiene conexión a través de una inductancia de compensación al borne de tensión intermedia de un divisor de tensión capacitivo. El divisor capacitivo posee dos condensadores, y por tanto, hará que el transformador de tensión capacitivo sea más susceptible para entrar en resonancia. Es por este motivo que en este TFG se analizará el comportamiento de la ferorrresonancia en el transformador de tensión inductivo, ya que esta susceptibilidad es menor, pues es necesario un valor de capacidad mayor para que se origine este fenómeno [3] (con el fin de amortiguarlo).

5.2 Ferorrresonancia

Para profundizar en este tema, se explicarán el origen y la definición de la ferorrresonancia, se realizará una distinción entre los diferentes tipos que se pueden dar y se comentarán las diferentes causas que producen este fenómeno y las consecuencias que éste ocasiona.

5.2.1 Origen y definición

Desde la creación del primer transformador se ha dado el fenómeno de la ferorrresonancia; sin embargo, desde los años 30 el interés de estudio de este fenómeno crece debido a que se convierte en un problema habitual al utilizar condensadores en serie para regular la tensión de redes de distribución.

Desde entonces, y a lo largo del último siglo, la ferorrresonancia se ha convertido en uno de los fenómenos más ampliamente estudiados en la ingeniería

eléctrica, ya que hoy en día aún puede llegar a provocar efectos catastróficos tanto en equipos que componen el sistema eléctrico como en el propio personal asociado [4].

La ferorrresonancia es un fenómeno de resonancia no lineal que afecta a las redes eléctricas. Suele producir sobretensiones o sobreintensidades transitorias o permanentes que, como se ha dicho, son peligrosas para los equipos eléctricos o incluso para el personal asociado a estos equipos.

Las condiciones necesarias en un circuito para la aparición de este fenómeno son la existencia de una inductancia no lineal, un condensador, una fuente de tensión y pérdidas débiles. Cuando estas condiciones se dan, el circuito puede estar en al menos dos regímenes permanentes estables; uno de ellos corresponde al ferorrresonante y el resto al no ferorrresonante (normal). Que esté o no en un régimen o en el otro dependerá de las condiciones iniciales del sistema.

5.2.2 Clasificación

Existen cuatro grupos en los que clasificar la ferorrresonancia en régimen permanente. Se procederá a explicar cada uno de estos respecto a su variación respecto al tiempo (t), su variación respecto a la frecuencia (f) y por último una imagen estroboscópica obtenida al medir y tabular los valores de la intensidad (i) y la tensión (v).

- Régimen fundamental
 - Las corrientes y tensiones son periódicas con periodo T igual al de la red. Su cantidad de armónicos puede variar.
 - El espectro es discontinuo y está formado por una frecuencia fundamental f_0 de la red y sus armónicos ($2f_0, 3f_0, \dots$).
 - La imagen estroboscópica muestra el punto de operación normal y el ferorrresonante.

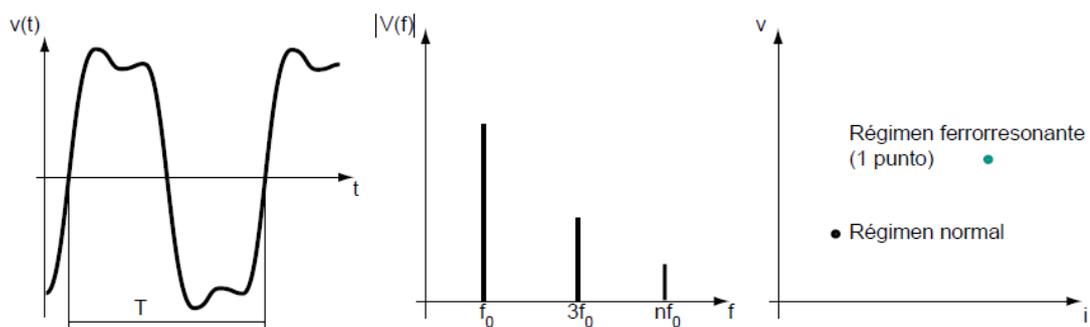


Figura 4. Ferorrresonancia Fundamental [5]

- Régimen subarmónico

- Las corrientes y tensiones son periódicas con periodo nT múltiplo del de la red. Recibe el nombre de subarmónico n .
- El espectro muestra frecuencia fundamental en f_0/n (siendo f_0 la frecuencia de red y n un número entero) y sus armónicos.
- La imagen estroboscópica muestra n puntos.

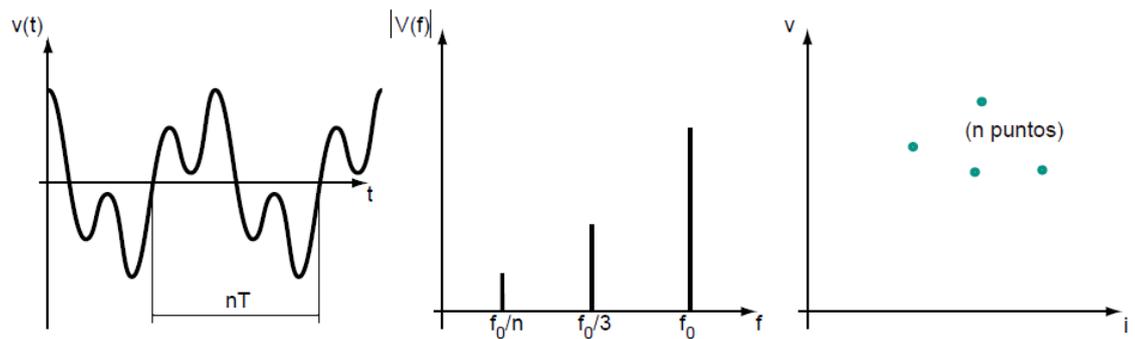


Figura 5. Ferorresonancia Subarmónica [5]

- Régimen casi-periódico

- Las corrientes y tensiones no son periódicas.
- El espectro muestra líneas donde las frecuencias se expresan como $nf_1 + mf_2$ (donde n y m son números enteros y f_1/f_2 son números reales irracionales).
- La imagen estroboscópica muestra una curva cerrada.

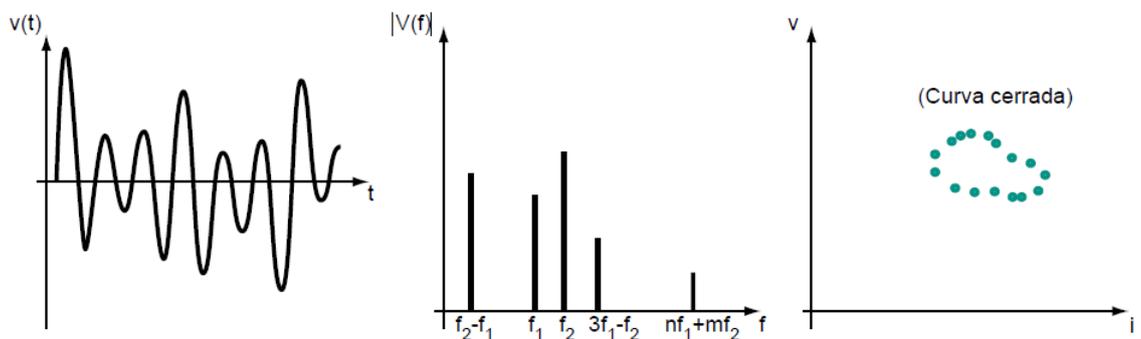


Figura 6. Ferorresonancia Casi-Periódica [5]

- Régimen caótico
 - Las corrientes y tensiones no son periódicas.
 - El espectro muestra continuidad, lo que significa que no se anulará para ninguna frecuencia.
 - La imagen estroboscópica muestra puntos que están en una superficie dentro del plano i, v denominada “atracción rara”.

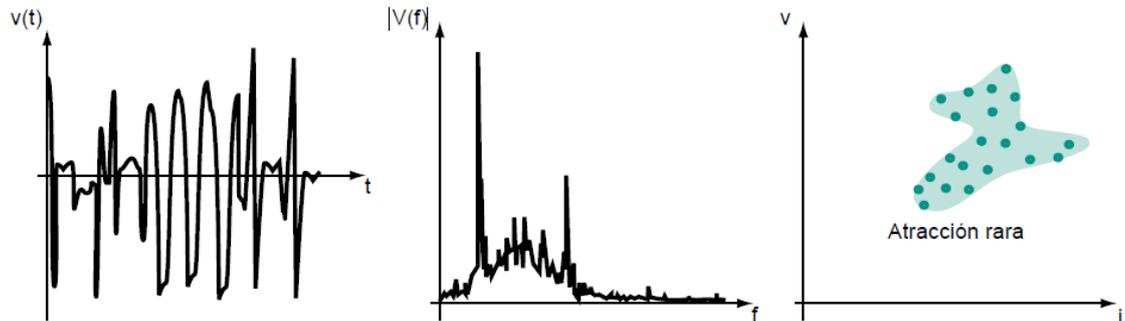


Figura 7. Ferrorresonancia Caótica [5]

5.2.3 Causas y efectos

Como causas necesarias (pero no suficientes) para la existencia de la ferorrresonancia se encuentran:

- Componentes poco cargados (por ejemplo, transformadores de potencia o de tensión en vacío) o fuentes de poca potencia de cortocircuito (alternadores).
- Conexión de condensadores y de bobinas de inductancia no lineal al mismo tiempo.
- Presencia de un punto cuyo potencial no sea fijo (fusión de un fusible, neutro aislado).

Es complicado que se de ferorrresonancia en un circuito que no cumpla alguna de las tres causas. En el caso de darse (y no cumpla ninguna de las causas) será necesario un estudio más exhaustivo de la situación para determinar las causas que han producido el fenómeno.

Entre todos los efectos que produce la ferorrresonancia los más comunes son:

- Sobretensiones permanentes elevadas entre fases o entre fase y tierra.
- Sobreintensidades permanentes elevadas.
- Distorsiones permanentes de las formas de onda de tensión y corriente.

- Otros efectos apreciables como ruidos permanentes y calentamiento de transformadores, disparo de protecciones repentinos, destrucción de materiales eléctricos, etc.

5.3 Ferorresonancia en un circuito LC serie no lineal

Se considera un circuito formado por un condensador en serie con una inductancia saturable en el que ocurre la ferorresonancia (que solamente puede ocurrir en circuitos no lineales). La existencia de esta inductancia implica que el circuito sea no lineal y simboliza a los equipos eléctricos que están compuestos por un núcleo ferromagnético en los que se enrollan devanados eléctricos como, por ejemplo, un transformador.

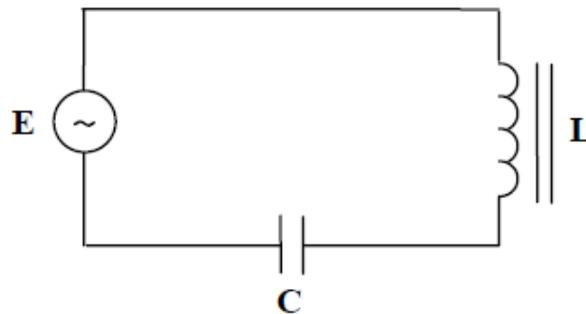


Figura 8. Circuito serie ferorresonante

5.3.1 Concepto de inductancia no lineal

La inductancia es una medida de la oposición a un cambio de corriente de un inductor y se define como la relación entre flujo magnético (Φ) e intensidad de corriente (I) que circula por la bobina y el número de vueltas (N) del devanado. Esta relación origina un campo magnético, y la inductancia es la variable que determina la capacidad de almacenamiento de energía en forma de ese campo magnético.

$$L = \frac{\Phi N}{I} \quad (1)$$

El valor de la inductancia aumenta según la superficie que es atravesada por el flujo es mayor y según la capacidad del material de canalizar el flujo es mayor. Esta capacidad de canalizar el flujo magnético a través del propio material recibe el nombre de permeabilidad magnética (μ), y es de utilidad a la hora de relacionar la intensidad del campo magnético (H) con la inducción magnética (B).

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

La representación gráfica de estas dos variables (B, H) da lugar a una curva que recibe el nombre de curva de primera imantación o curva de magnetización [1]. La curva varía según el material que forma el circuito magnético, pero es independiente de las dimensiones geométricas del circuito.

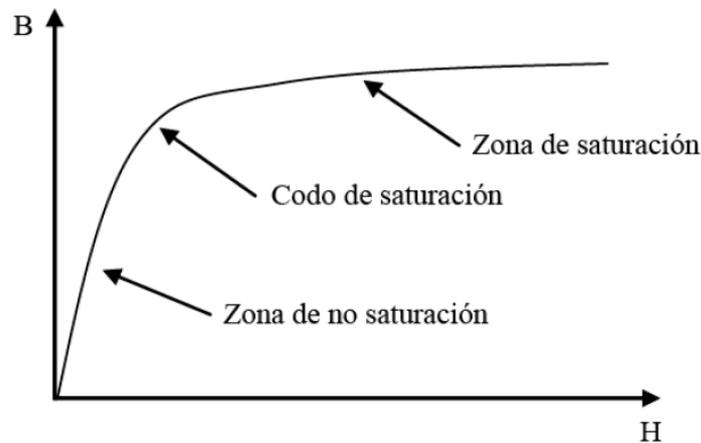


Figura 9. Curva de magnetización de un material ferromagnético

Para el caso de que el material sea aire, la curva de saturación será una recta, es decir, que la relación entre B y H es lineal. Esto implica que la permeabilidad (μ) es constante y, por tanto, la inductancia también lo es. Este caso corresponde a inductancia lineal.

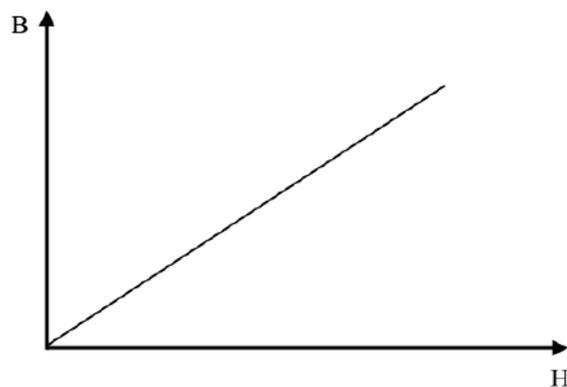


Figura 10. Curva de magnetización del aire

Para el caso del material ferromagnético, la permeabilidad (μ) no es constante ya que depende de las condiciones de trabajo del material. Además, existe un máximo de flujo que el material es capaz de admitir, representada en la zona de saturación.

En el caso de este TFG, al tratarse de transformadores, la inductancia será no lineal por tener una relación entre intensidad de corriente y flujo magnético cuya representación gráfica coincide, a otra escala, con la curva de magnetización, comúnmente llamada curva de saturación.

5.3.2 Cálculo gráfico del punto de operación

La reactancia inductiva no lineal puede ser representada por dos reactancias inductivas, según el lugar de la curva de saturación.

- Para la zona lineal: $X_L = w * L_{lineal}$
- Para la zona saturada: $X_L = w * L_{sat}$

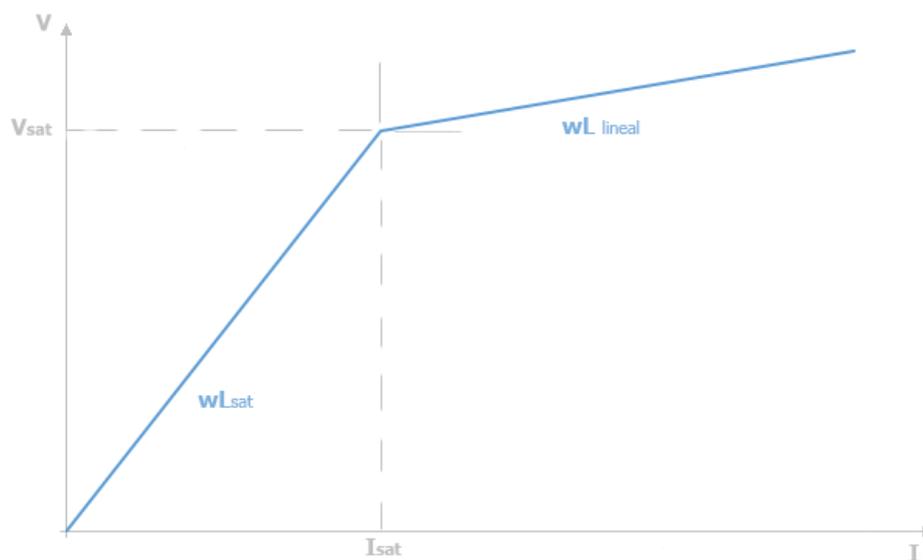


Figura 11. Descomposición de la curva de saturación

En el caso de la ferorresonancia, producida por la no linealidad del circuito, coexisten dos estados estables permanentes, uno ferorresonante y otro no ferorresonante. Se pasa de un estado a otro con sólo realizar pequeñas modificaciones en los parámetros y magnitudes del circuito. En el estado no ferorresonante (condiciones normales) el circuito es predominantemente inductivo, mientras que en el estado ferorresonante, el circuito es predominantemente capacitivo.

Este posible cambio de carácter inductivo o capacitivo del circuito es debido a la entrada en saturación de la bobina, que produce un cambio en el valor de la inductancia no lineal (L_{sat}). Este valor es bastante menor que el valor de la inductancia lineal (L) y debido a ello la reactancia del circuito disminuye pudiendo

producir un cambio en el carácter inductivo del circuito, facilitando así la aparición de la ferorrresonancia.

Representando la curva de saturación tensión-intensidad del circuito LC serie no lineal, y las rectas de “ V_C ” y de “ $E + V_C$ ” (sabiendo que “ $E = V_C + V_L$ ”):

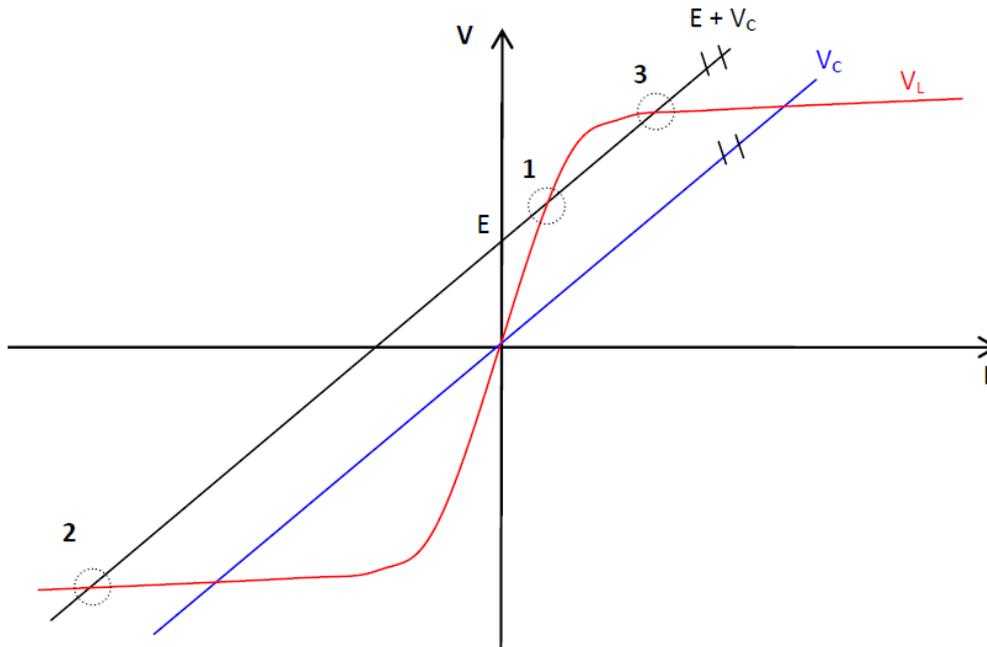


Figura 12. Obtención de los posibles puntos de operación de un circuito ferorrresonante serie [6]

Donde 1, 2 y 3 representan los cortes de la recta “ $E + V_C$ ” con la curva de saturación tensión-intensidad (V_L) que a la vez son los diferentes posibles puntos de funcionamiento que presenta el sistema.

- Punto 1

El primer punto representa un estado de funcionamiento en el que la inductancia no está saturada. Como la reactancia inductiva es mayor que la reactancia capacitiva ($X_{L\text{-lineal}} > X_C$) el circuito se encuentra en una situación predominantemente inductiva.

- Punto 2

El segundo punto representa un estado de funcionamiento en el que la inductancia está saturada. Como la reactancia inductiva es menor que la reactancia capacitiva ($X_{L\text{-sat}} < X_C$) el circuito se encuentra en una situación predominantemente capacitiva.

- Punto 3

El tercer punto representa un estado transitorio, es decir, representa una situación que puede aparecer, pero sólo durante un breve periodo de tiempo puesto que no es estable [5]. Cuando el sistema esté en este tercer punto, su situación cambiará rápidamente a la del primer punto. Es un punto de operación inestable.

Como ya se ha comentado, los dos posibles puntos de funcionamiento que se dan en la realidad son el 1 y el 2, ya que el 3 corresponde a un punto de operación inestable. El punto 1, que es predominantemente inductivo, corresponde con el punto de funcionamiento normal del circuito, mientras que el punto 2, que es predominantemente capacitivo, corresponde con el funcionamiento ferorrresonante del circuito. Que el transformador trabaje en cualquiera de estos dos puntos dependerá de las condiciones iniciales del sistema y de las magnitudes de sus parámetros.

Mostrando gráficamente el carácter inductivo y capacitivo de ambos puntos de operación se tiene que las tensiones en cada caso son:

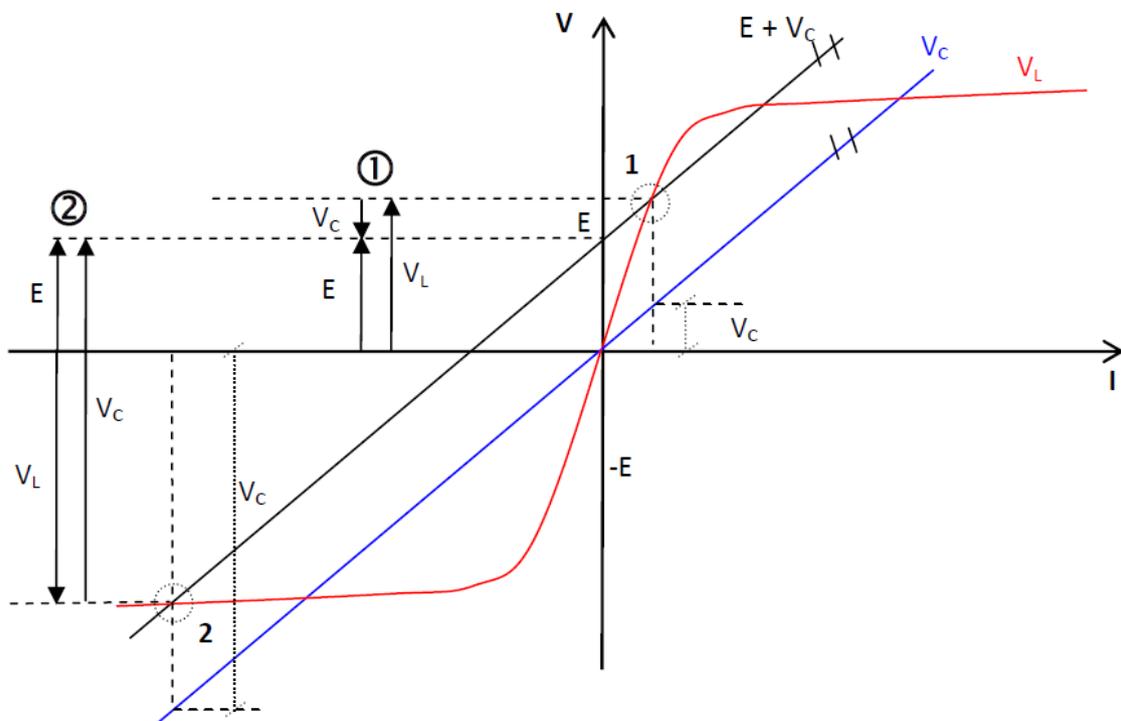


Figura 13. Tensiones de los puntos de operación del circuito no lineal [6]

5.4 Circuito de supresión

Una vez vistos los efectos que produce la ferorrresonancia, queda justificada la necesidad de disponer de un método que pueda atenuar lo máximo posible las consecuencias que éste fenómeno produce. Para poder llegar a una conclusión, se explicará con brevedad que soluciones han propuesto diversos autores a lo largo de la historia para mitigar los efectos del fenómeno.

L. N. Robinson [7], fue la persona que trató por primera vez en 1915 la ferorrresonancia en los transformadores de tensión. Su solución (como la de otras personas que estudiaron el fenómeno posteriormente) fue la de incluir un circuito de amortiguamiento, como se puede observar en la siguiente figura.

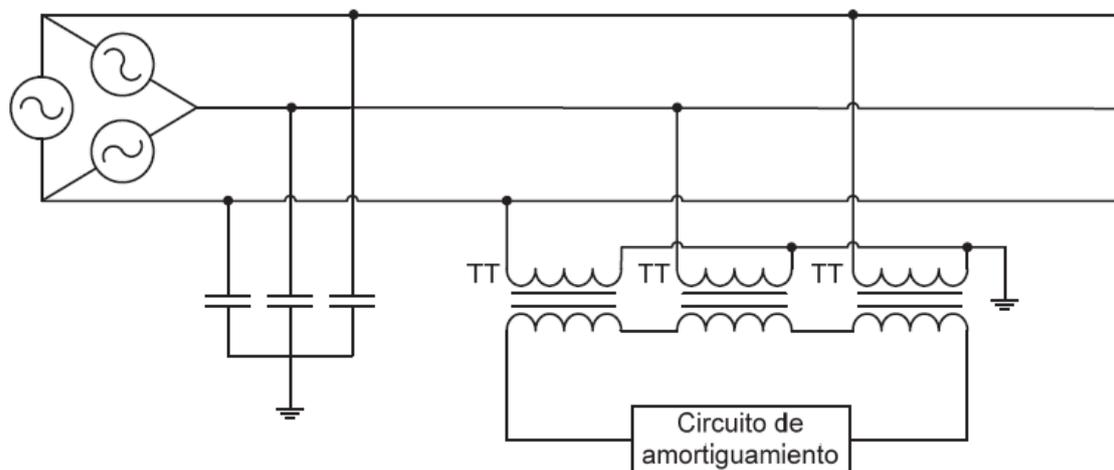


Figura 14. Circuito de amortiguamiento en el triángulo abierto formado por los devanados secundarios.

Posteriormente, en 1941, se aporta como solución conectar una carga en el secundario de los transformadores. La carga conectada puede ser resistiva (menor al 33% del valor de la reactancia magnetizante por fase) o inductiva (menor al 28 % de la reactancia magnetizante por fase).

A finales del siglo XX, diversos autores (entre los que se destacará a D. A. N. Jacobson [8]), insisten en la inclusión de la resistencia de amortiguamiento en los secundarios de los transformadores, proponiendo unos valores de carga aproximados del 5-10% de la carga nominal del transformador; valor que aumentará años más tarde al tener en cuenta las diferentes condiciones y las características del circuito (especialmente su capacidad). Las cargas resistivas no podrán estar indefinidamente conectadas, ya que esto generaría pérdidas permanentes en el transformador.

El mismo D. A. N. Jacobson plantea la inclusión de las cargas inductivas permanentes, idea que descarta por motivos económicos y de seguridad. También plantea la conexión de cargas resistivas únicamente cuando se da la aparición de la ferorrresonancia, pero nota que una vez establecida ésta, para que se pueda suprimir el efecto que produce, la carga resistiva a conectar debe ser un 40% mayor a la propuesta inicialmente, además de que el circuito debe poder disipar energía a mayor velocidad que la que aporta el sistema o de lo contrario se volvería a establecer un régimen ferorrresonante (aunque de menor energía).

En lo que a medidas de prevención en transformadores de tensión inductivos se refiere, cabe destacar el artículo publicado por T. Van Craenenbroeck et al. En el año 2000 [9]. Craenenbroeck llega a la conclusión de que la manera más efectiva de prevención de ferorrresonancia es la amortiguación de las oscilaciones del fenómeno, acción que logra introduciendo pérdidas en el secundario del transformador. Esto es conseguido por diferentes tipos de circuitos amortiguadores, siendo los más frecuentes:

- Una resistencia.

Es la solución más simple y la que más se suele utilizar, aunque no es recomendable añadirla al circuito de manera permanente sobre todo en sistemas aislados, debido a que al operar durante mucho tiempo en condiciones de falta a tierra se pueden dar sobretensiones que fuercen a la resistencia a disipar más de lo esperado, pudiendo dañar el circuito.

- Un filtro LC conectado en serie con una resistencia.

Al diferenciar entre frecuencia fundamental y frecuencias subarmónicas, este método permite reducir las oscilaciones ferorrresonantes a frecuencia diferente a la fundamental. Como contrapartida, es necesaria la inclusión de una resistencia extra en el circuito para poder amortiguar también las oscilaciones en la frecuencia fundamental.

- Una inductancia saturable conectada en serie con una resistencia.

Es válido para cualquier oscilación ferorrresonante. La inductancia saturable hará de interruptor magnético; de esta forma, el circuito trabajará de manera normal y cuando entre en saturación (por ferorrresonancia), también lo hará la inductancia dejando actuar a la resistencia conectada en serie para amortiguar el fenómeno [10].

Entre los investigadores del siglo XXI se destacará a W. Piasecki [11], que nota que la solución que había sido válida anteriormente para amortiguar la ferorrresonancia propuesta por D. A. N. Jacobson y Craenenbroeck no era óptima para transformadores de tensión modernos diseñados con materiales de bajas pérdidas magnéticas. Para este tipo de transformadores sería necesaria una resistencia muy pequeña y esto podría producir sobrecargas térmicas en condiciones anormales de operación como por ejemplo faltas a tierra.

Es por esto que propone añadir la resistencia de amortiguamiento solamente cuando se produzca la ferorrresonancia. De esta manera, cuando existe la ferorrresonancia, la resistencia tiene un valor bajo para poder amortiguar el fenómeno; y cuando existen condiciones anómalas de operación (como faltas a tierra) la resistencia tendrá un valor alto para prevenir las sobrecargas técnicas. W. Piasecki también propone diferentes valores que deben tener la inductancia saturable y la resistencia para diferentes circuitos basados en simulaciones realizadas [12]. La parte negativa de este método es que es necesario un dispositivo capaz de detectar cuales son las situaciones en las que el circuito se encuentra en estado de ferorrresonancia.

Una de las opciones planteadas es el uso de una inductancia no lineal en serie con una resistencia de amortiguamiento. La inductancia no lineal actúa como interruptor magnético, conectando la resistencia cuando entra en saturación y manteniéndola desconectada en condiciones normales de funcionamiento. Esta opción es precisamente la que será utilizada en este TFG. También es posible la conexión/desconexión de la resistencia de amortiguamiento haciendo uso de conmutadores basados en dispositivos de electrónica de potencia.

6. Análisis de las alternativas

En este apartado se presentan las diferentes alternativas existentes respecto a la realización del trabajo, eligiendo la que se considere la opción más adecuada. Para ello se establecen una serie de características en cada alternativa y se realiza una comparación entre estas.

6.1 Métodos de análisis para el estudio de transformadores de tensión

Es necesario hallar un método de estudiar los transformadores de tensión para estudiar los efectos que se producen en este durante la experimentación. Se puede recurrir a diferentes alternativas, que se explican a continuación.

6.1.1 Identificación de las alternativas

Dentro de las posibles alternativas, se diferencian tres:

- Pruebas de campo:

Se trata de conectar el transformador a la red y de hacer pruebas sobre el mismo. Esto permite que los resultados obtenidos sean más fiables, pero en contrapartida, es la alternativa que más recursos gasta además de tener la posibilidad de poner en riesgo la integridad del transformador.

- Modelo de laboratorio:

En esta alternativa el ensayo se realiza en el transformador o en un prototipo del transformador situado en un laboratorio preparado para hacer estos ensayos. Los resultados que se obtienen también son muy fiables, necesitando también menos recursos que la alternativa anterior.

- Simulación software:

Consiste en diseñar un transformador de tensión con inductancia variable mediante herramienta software sobre el que realizar los ensayos necesarios. Los recursos necesarios son menores que en los dos primeros casos y además se evita el problema de dañar el transformador. Ofrece unos resultados fiables.

6.1.2 Definición de los criterios de selección

Para poder decidir cuál de las posibles alternativas elegir, se definen la siguiente lista de criterios:

- Coste económico:

Es la cantidad de recursos que son necesarios para poder realizar el proyecto desde el punto de vista monetario. Debe ser lo más económico posible.

- Recursos humanos y técnicos:

Es la cantidad de personas y materiales necesarios para llevar a cabo el trabajo. También interesa utilizar los menores recursos posibles.

- Seguridad:

Trata de que el trabajo se realice satisfactoriamente bajo los menores riesgos posibles, tanto para las personas que realizan el trabajo como para los instrumentos y máquinas que forman parte de éste.

- Cantidad de información:

Se evalúa qué tipo de datos útiles es capaz de ofrecer la alternativa y cuántos de estos datos pueden ser utilizados para realizar el trabajo. Interesa obtener mucha información con la que trabajar después.

- Precisión:

Se evalúa la calidad de la información obtenida, ya que debe ser fiable para poder representar de manera óptima la situación real.

6.1.3 Selección de la solución

Para elegir la solución, se realiza una tabla que recoge las tres alternativas que se han propuesto y valora cada criterio de selección antes mencionado para cada una con el objetivo de realizar una comparación entre ellas. Además, para que la elección final se haga con mayor criterio, se ha establecido un peso de importancia para cada criterio. La valoración se realizará sobre 10, siendo el 0 el peor resultado y 10 el mejor.

	Peso (%)	Pruebas de campo	Modelo de laboratorio	Simulación software
Coste económico	30	1	4	9
Recursos humanos/técnicos	10	2	5	8
Seguridad	15	4	8	10
Cantidad de información	20	6	7	8
Precisión	25	10	8	6
Total		4,8	6,3	8,1

Tabla 1. Selección del método de análisis

Las pruebas de campo son las que requieren de una mayor inversión económica, de recursos humanos y técnicos. A cambio ofrecen unos resultados muy fiables y con la mejor precisión posible. La cantidad de información que se puede obtener mediante las pruebas de campo no es tanta como en las otras dos alternativas, puesto que en el transformador solo se podrán medir tensiones e intensidades en los terminales. Pese a tener una seguridad aceptable, tiene menor seguridad en comparación con las otras dos alternativas.

El modelo de laboratorio necesita también bastantes recursos económicos, humanos y técnicos; aunque menos que la alternativa anterior. Realizar un modelo del transformador ofrece las ventajas de realizar mediciones de muy buena precisión y fiabilidad en un entorno seguro. Es posible parar el transformador para realizar diferentes medidas, pudiendo ofrecer más información que si el transformador estuviera conectado a la red (prueba de campo).

La simulación software supera en todos los aspectos a las primeras dos alternativas salvo en precisión. Sólo se requiere de un ordenador y licencia del software elegido para poder realizar los ensayos, los cuales se podrán repetir las veces que sean necesarias y sin la necesidad de correr ningún riesgo.

Por los motivos que se acaban de presentar, se decide que la mejor alternativa para la realización de este trabajo será la simulación mediante software.

6.2 Elección de la herramienta software

Puesto que se ha decidido que el trabajo sea realizado mediante simulación por software, es necesaria una herramienta software con la que modelizar el transformador sobre el que se analizará el fenómeno de la ferorrresonancia. Existen varios tipos de herramientas con las que se podrían modelizar los elementos eléctricos

necesarios, pero para realizar este TFG se consideran tres alternativas (siendo cualquiera de las tres más que suficiente para poder realizar los análisis necesarios).

6.2.1 Identificación de las alternativas

- PSCAD

Permite realizar diseños y simulaciones de sistemas eléctricos y electrónicos de potencia. Tiene una interfaz de fácil manejo capaz de ser personalizada. Es especialmente buena para estudiar comportamientos transitorios en sistemas eléctricos.

- MATLAB

Es un programa de software matemático que combina cálculo numérico con representaciones gráficas mediante su propio lenguaje de programación. Dispone de una herramienta denominada Simulink que sirve para modelizar y diseñar diferentes tipos de sistemas mediante bloques, de forma gráfica e intuitiva.

- ATP

ATP es un programa utilizado para analizar circuitos eléctricos, especializándose en el estudio del régimen transitorio. También permite realizar circuitos mecánicos y de control. Los datos de entrada necesarios son diferentes y superiores a los de otros programas.

6.2.2 Definición de los criterios de selección

- Coste económico:

Es el valor de la licencia del programa requerido para realizar las simulaciones. Existen herramientas software con licencia gratuita, pero otras deben ser compradas.

- Facilidad de uso:

Interesa que la herramienta software sea intuitiva y con una interfaz lo más simple posible, que permita realizar las operaciones necesarias de la manera más sencilla posible.

- Precisión:

Se busca que la herramienta elegida ofrezca unos resultados fiables y de calidad, para poder hacer una buena representación de lo que ocurre en la realidad.

- Tiempo de simulación:

Es el tiempo que tarda la herramienta software en realizar los cálculos y simulaciones de lo que se le ha indicado. Interesa que los tiempos sean lo menor posible, debido a que lo normal es que se realicen varios ensayos, agilizando el proceso.

- Aptitudes:

Se valora que la herramienta sea capaz de realizar las simulaciones y análisis que se necesiten. Además, que la realización de estas se realice de una forma sencilla, existiendo otras formas de realizar las simulaciones si no se obtienen los resultados deseados de la manera principal.

- Flexibilidad:

La herramienta software debe ser capaz de variar valores de las simulaciones en todo momento sin tener que cambiar todo el sistema, ya que en muchos casos una primera simulación no permite obtener los resultados deseados y hace falta realizar modificaciones sobre esta para ajustar los resultados.

6.2.3 Selección de la solución

Para elegir la solución, se realiza una tabla en la que se recogen las tres alternativas que se han propuesto y valora cada criterio de selección antes mencionado para cada una de ellas con el objetivo de realizar una comparación entre las alternativas. Además, para que la elección final se haga con mayor criterio, se ha establecido un peso de importancia para cada criterio. La valoración se realizará sobre 10, siendo el 0 el peor resultado y 10 el mejor.

	Peso (%)	PSCAD	MATLAB	ATP
Coste económico	10	5	4	9
Facilidad de uso	25	8	7	1
Precisión	20	8	6	10
Flexibilidad	20	9	10	9
Aptitudes	15	4	9	7
Tiempo de simulación	10	4	7	5
Total		6,9	7,4	6,5

Tabla 2. Valoración de la herramienta software

ATP cuenta con una licencia gratuita y tiene una precisión excelente, por su método de resolver las ecuaciones diferenciales. Sin embargo, no permite realizar una

interfaz gráfica como hace MATLAB, es mucho más complicado de usar que las otras dos herramientas.

MATLAB tiene versión de prueba gratuita, pero la licencia es de pago. Es relativamente fácil de utilizar. Es la menos precisa de entre las tres herramientas ya que las otras dos se especializan en transitorios, pero la diferencia en este aspecto no es muy grande, como tampoco lo es en los tiempos de simulación, donde MATLAB es el mejor de los tres. MATLAB cuenta con la posibilidad de realizar interfaces personalizadas.

PSCAD tiene versión gratuita, aunque está limitada. Es la herramienta más sencilla de utilizar, es precisa por especializarse en transitorios. Sin embargo, no permite realizar interfaces y el tiempo de simulación es el más largo de los tres.

Por los motivos que se acaban de presentar, se decide que la mejor alternativa para la realización de este trabajo será la herramienta software MATLAB (al no ser tan fundamental obtener datos de la zona transitoria).

7. Descripción de la solución

Para realizar el estudio de la ferorrresonancia en transformadores de tensión no lineales es necesario modelizar un transformador e inductancias no lineales y someterlo a las condiciones necesarias para que se produzca la ferorrresonancia. Después se debe diseñar, modelizar e implementar un circuito que sea capaz de amortiguar las oscilaciones ferorrresonantes, de manera que el rendimiento del resto del circuito no se vea afectado. Tanto el transformador de tensión como la inductancia no lineal han sido desarrolladas en otros TFG, aun así, se realiza en los siguientes subapartados una breve explicación de cada uno.

7.1 Montaje base

En este apartado se incluirán los elementos que no formen parte del circuito de supresión de la ferorrresonancia, es decir, del circuito que se debe amortiguar.

7.1.1 Fuente de tensión

Todos los modelos que se incluyen en este TFG están alimentados por una fuente de tensión alterna conectada a una impedancia en serie que representa la resistencia interna de la fuente de tensión.

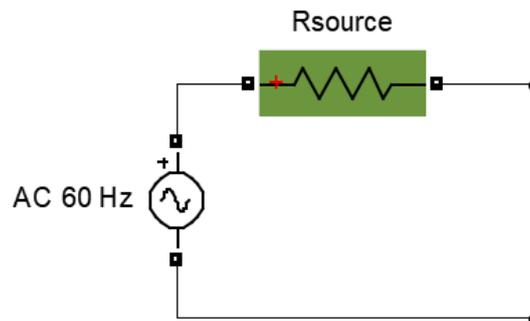


Figura 15. Fuente de tensión

- Se trata de una fuente de tensión de valor $V = 120\sqrt{2}$ y de frecuencia 60Hz.
- La impedancia tiene el valor de $R = 0.1444$.

7.1.2 Transformador de tensión

El transformador de tensión puede ser estudiado en dos partes diferenciadas, siendo la primera las inductancias no lineales que se incluyen en él y la segunda el propio transformador.

Inductancia no lineal:

Como ya se ha comentado previamente, se ha decidido modelizar una inductancia no lineal para que el transformador entre en saturación. La saturación que experimenta el transformador puede ser representada mediante la curva de saturación que, a su vez, puede representarse en función de flujo magnético e intensidad o en función de tensión e intensidad.

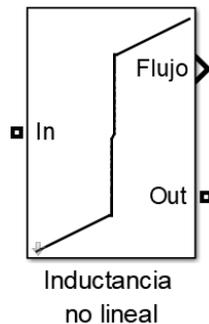


Figura 16. Inductancia no lineal

Esta figura 16 es un bloque gráfico de la herramienta de MATLAB-Simulink, que se compone de diversos bloques a su vez.

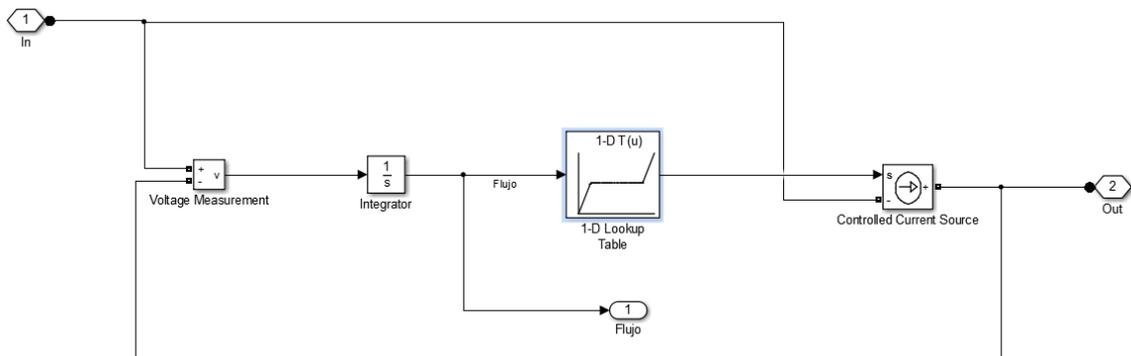


Figura 17. Composición de la inductancia no lineal

De manera rápida, el bloque de fuente de corriente controlada convierte la señal de intensidad que viene de la no linealidad en una fuente de corriente equivalente. La corriente generada es conducida por la señal de entrada del bloque.

La función que relaciona el flujo con la intensidad se ha obtenido utilizando un bloque llamado “Lookup Table” para una dimensión. En este bloque se introduce un vector flujo de entrada, que se definirá mediante un script de MATLAB, cuyos valores marcan los puntos de ruptura sobre los cuales se establecen los valores del vector corriente que es el de salida. Esto crea una función no lineal entre flujo e intensidad, que es la curva de saturación.

Los valores de intensidad y flujo que se relacionan para obtener la curva de saturación se pueden apreciar en la siguiente tabla.

Intensidad (pu)	Flujo (pu)
0	0
0,0119	0,0718
0,0471	0,2121
0,086	0,2819
0,0987	0,3508
0,1268	0,419
0,1747	0,4861
0,2429	0,552
0,2926	0,6165
0,385	0,6795
0,4855	0,7409
0,7481	0,8575
0,9272	0,9126
1,1375	0,9654
1,4001	1,0159
1,6942	1,0634
2,0755	1,1083
2,5354	1,15
3,2082	1,1887
4,3472	1,2231
6,4609	1,252
10,1825	1,2749
16,9401	1,292
30,4139	1,3044
56,1211	1,3133
87,4059	1,3189
112,2701	1,3222
127,4244	1,324
132,671	1,3244
2.224,98	1,9047

Tabla 3. Valores de intensidad y flujo de la inductancia no lineal

La correspondiente curva de saturación resulta, por tanto:

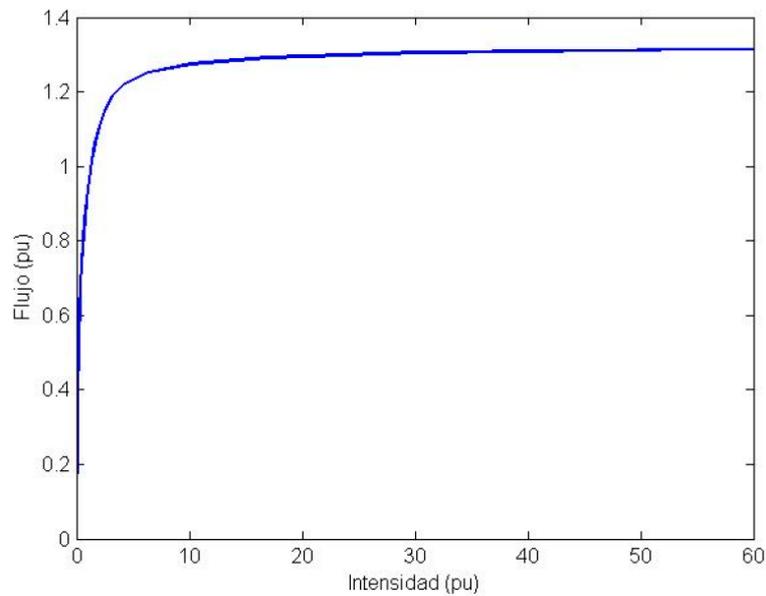


Figura 18. Detalle de la curva de saturación

Transformador en π :

El modelo utilizado para realizar las experimentaciones necesarias es un transformador de modelo en π . Es por esto que cada una de las dos inductancias no lineales que se encuentran en el transformador tendrán el valor del doble del valor total de inductancia del transformador. Se elige un modelo en π y no en T, porque éste primero presenta una mayor precisión, además de que el modelo en T puede dar fallos a la hora de reproducir el comportamiento del transformador. Es por esto que el modelo π es mejor para el estudio de transitorios electromagnéticos sobre transformadores.

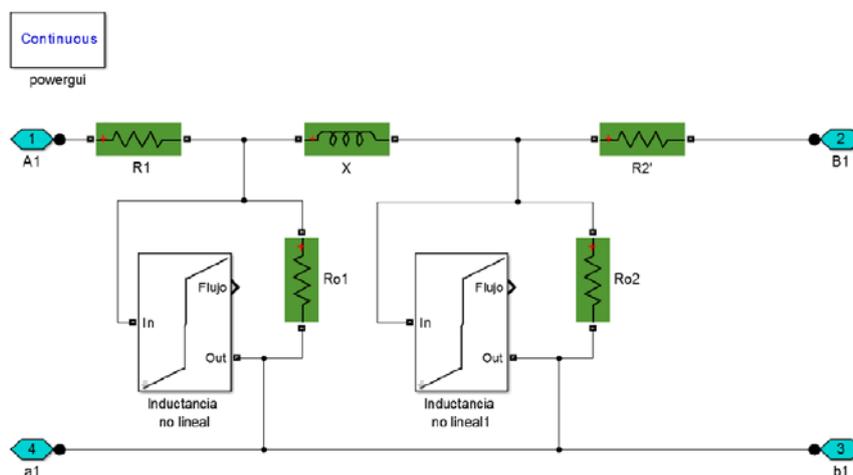


Figura 19. Composición del transformador de tensión

Existen dos ramas de vacío, cada una de ellas con su correspondiente resistencia e inductancia no-lineal. Los valores de los diferentes elementos son:

Elemento	Valor
R1 [Ω]	0,306
R2' [Ω]	0,305
X [mH]	8,778
R01 [Ω]	2.149,42
R02 [Ω]	2.149,42

Tabla 4. Valores de los elementos del transformador [6]

Posteriormente, al mismo transformador se le colocan amperímetros en serie y voltímetros en paralelo en diferentes lugares con el objetivo de obtener diversas mediciones de intensidad y tensión.

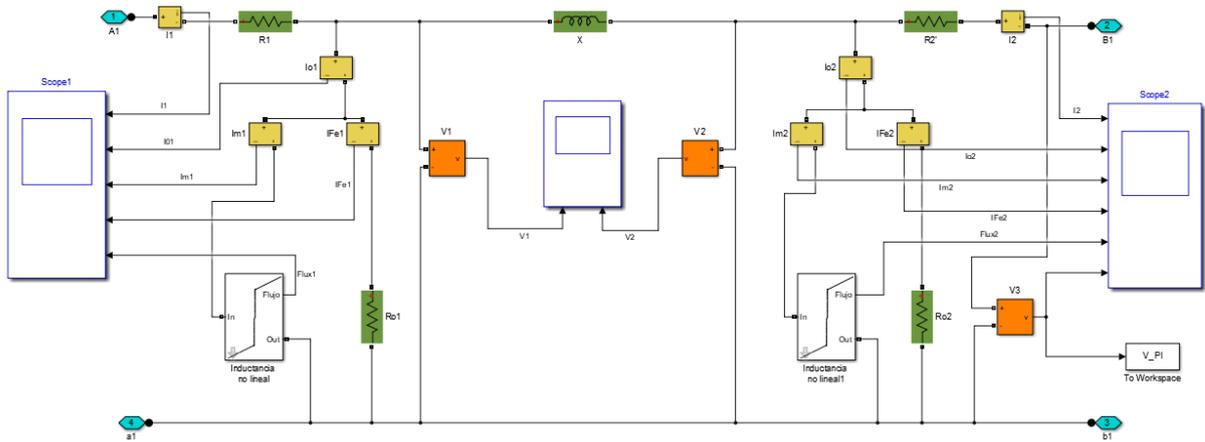


Figura 20. Composición del transformador de tensión con instrumentos de medida

Obteniendo las diferentes relaciones entre tensiones e intensidades y representándolas gráficamente se obtiene la curva de saturación correspondiente al transformador.

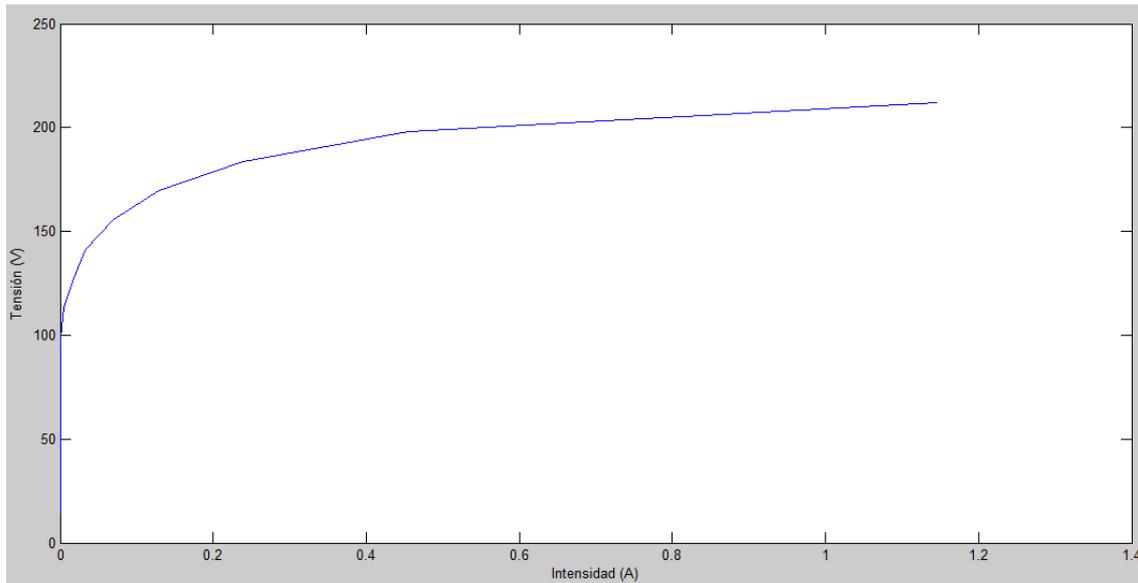


Figura 21. Curva de saturación del transformador

7.1.3 Condensador

Antes de realizar ninguna otra conexión, debe asegurarse que se conecta en serie un condensador que represente la capacitancia de las líneas de distribución. Además, sin este elemento, no se produciría la ferorrresonancia.

La conexión de la fuente de tensión con el transformador y el condensador da lugar al circuito sobre el que se conectará el circuito de supresión de la ferorrresonancia. El valor del condensador es de 20 μF .

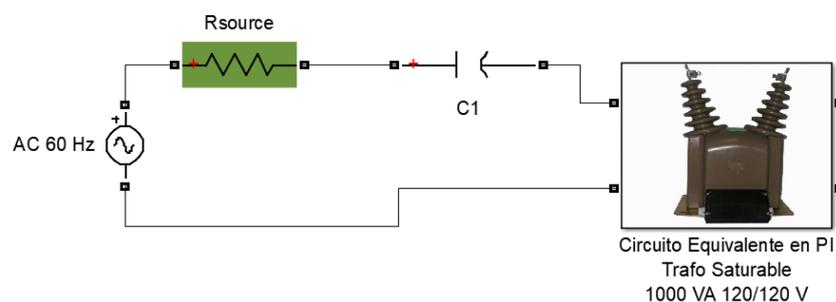


Figura 22. Conjunto fuente, condensador y transformador conectados

La conexión que se observa en esta figura es la que se realizará en este TFG, debido a que en ella se produce la ferorrresonancia. Esto se puede observar si se obtienen los valores de tensión e intensidad en función del tiempo. Para la simulación en 0,5 segundos:

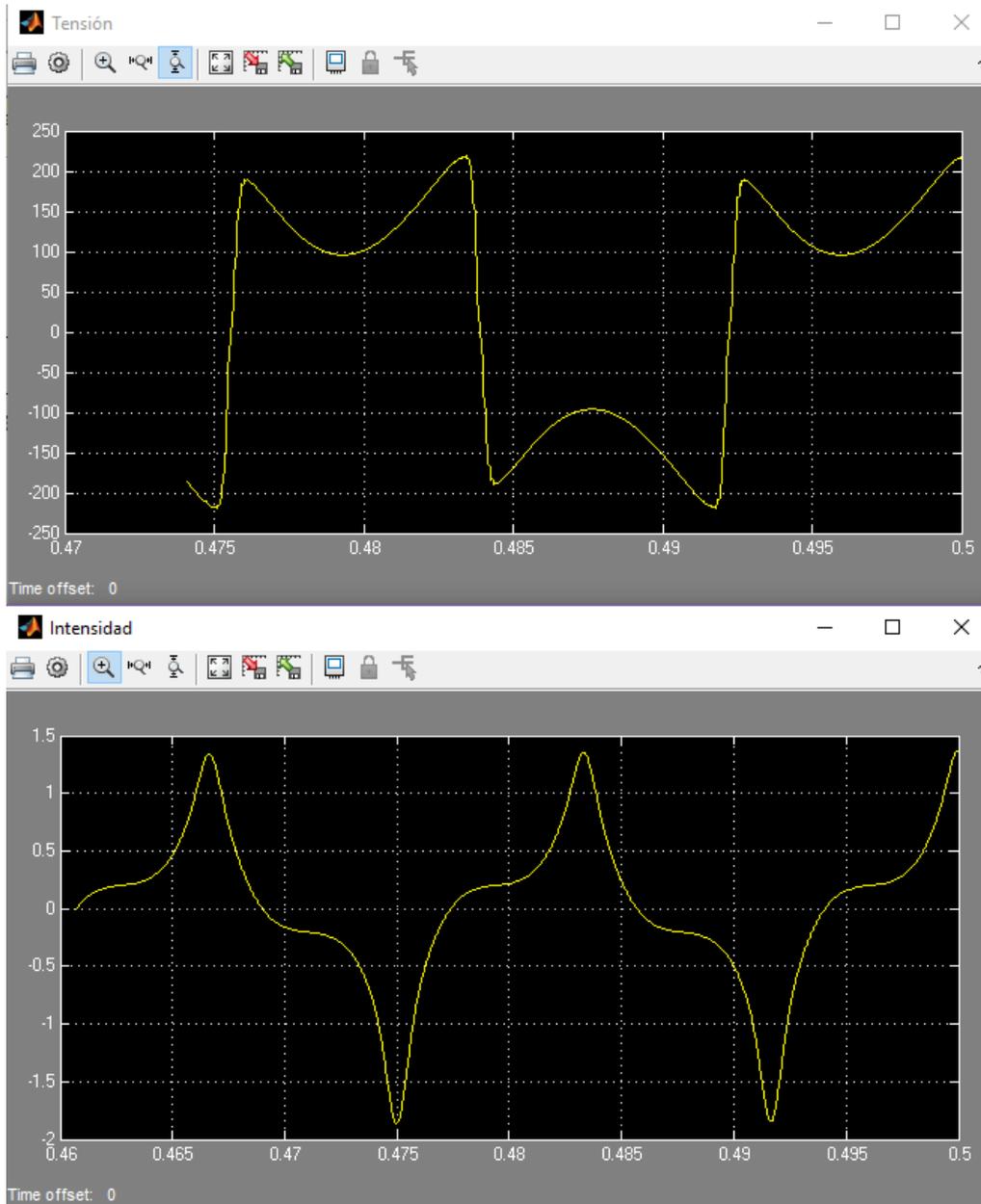


Figura 23. Tensión e intensidad de circuito ferorrresonante

Al ser clara la presencia de ferorrresonancia en el circuito, queda justificada la necesidad de diseñar un circuito que pueda amortiguar sus efectos.

7.2 Circuitos de supresión de la ferorrresonancia

Se procede a analizar un diseño de un circuito de supresión mediante una conexión con un interruptor común. Ante las desventajas que este circuito presenta, se diseña un segundo circuito de supresión que amortigua la ferorrresonancia del mismo modo que el primer circuito, pero que no tiene las desventajas del primero.

7.2.1 Conexión con interruptor

En esta primera conexión se unen los bornes del secundario del transformador al circuito de supresión, el cual se compone de una resistencia de valor $200\ \Omega$ (como se verá en el siguiente apartado) de la que el circuito dispone al cerrar un interruptor ($0,1\ \Omega$).

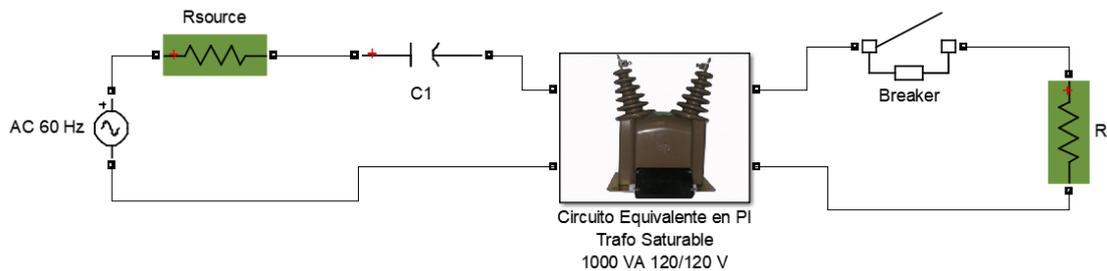


Figura 24. Situación de conexión con interruptor común.

El interruptor debe cerrarse cuando ocurra el fenómeno de la ferorrresonancia y no antes, de lo contrario la inclusión de la resistencia afectará negativamente al rendimiento del transformador.

7.2.2 Conexión con interruptor magnético

Puesto que en el caso anterior se intenta solucionar el problema una vez que ha ocurrido, debe mejorarse la forma de amortiguar la ferorrresonancia. Es para eso que se diseña un circuito similar que cambia el interruptor por uno que funciona de manera automática, mediante una inductancia no lineal. Esta inductancia no lineal actuará de interruptor magnético, adelantando a la saturación del núcleo del transformador de modo que el comportamiento del circuito se puede dividir en dos zonas.

1. El núcleo magnético aún no ha entrado en saturación, por eso la inductancia no actúa y mantiene el circuito en las condiciones de funcionamiento normales.
2. El núcleo magnético está a punto de entrar en saturación, pero antes de que eso pudiera ocurrir se satura la inductancia, cerrando el circuito y permitiendo actuar a la resistencia de amortiguación. Esta resistencia logra amortiguar los efectos de la ferorrresonancia, permitiendo al circuito funcionar de forma habitual.

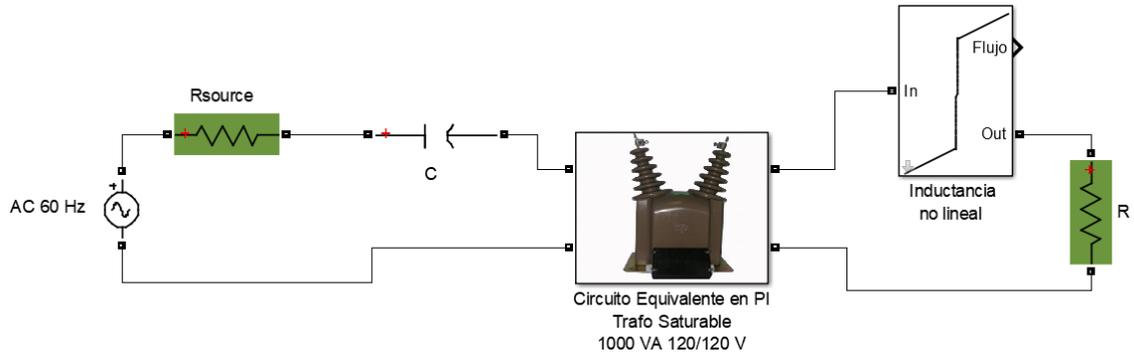


Figura 25. Situación de conexión con interruptor magnético

En el siguiente apartado se va a proceder a definir los parámetros que deben caracterizar el circuito de supresión de ferorrresonancia no lineal. En este sentido es importante diseñar la curva de saturación de la inductancia no lineal, de forma que esta se sature antes que el propio transformador a la inductancia no lineal.

8. Metodología

Este apartado se centra en mostrar los resultados de las diferentes simulaciones realizadas mediante MATLAB y su herramienta Simulink, para lo cual se muestran primero los valores numéricos con los que se realizan los ensayos. Posteriormente se observan los valores que se obtienen, se representan gráficamente y se realiza su correspondiente análisis, para extraer unas conclusiones sobre el estudio los circuitos de supresión de ferorresonancia.

8.1 Análisis del montaje base

Se comienza analizando el circuito base, más concretamente realizando pruebas en el transformador conectado a la fuente de tensión en el primario y en vacío en el secundario, con el objetivo de hallar la curva de saturación del transformador. No se ha incluido el condensador en el montaje, aunque posteriormente sí se deba tener en cuenta, porque no influye a la curva de saturación del transformador.

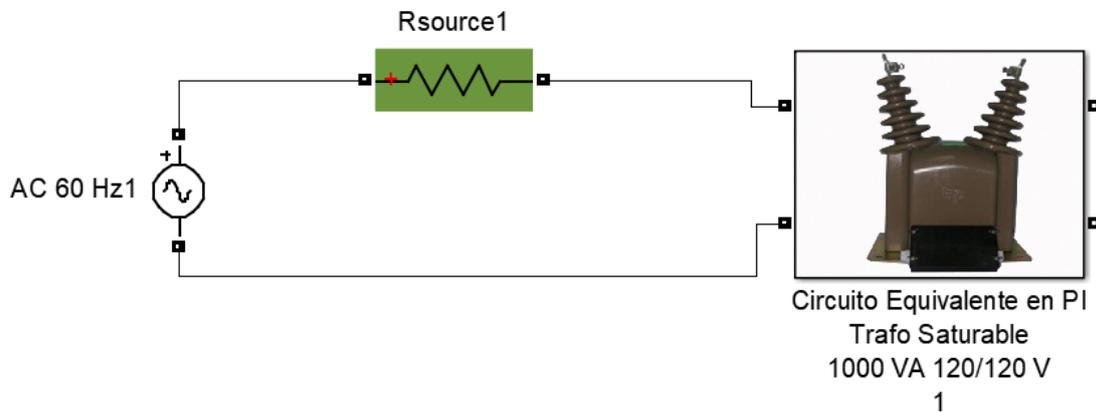


Figura 26. Montaje para hallar la curva de saturación.

Obteniendo para los valores de tensión en cada momento los valores de intensidad en esos mismos instantes (mediante aparatos de medición representados por bloques de la herramienta Simulink), y representándolos gráficamente, se obtiene la curva de saturación del transformador. El tiempo de simulación es de 0,5 segundos.

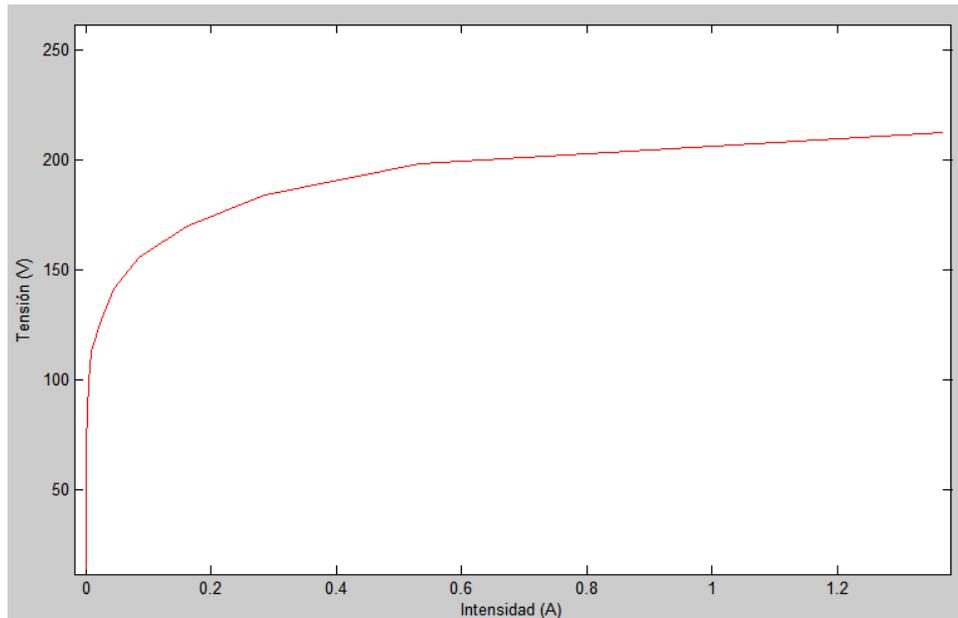


Figura 27. Curva de saturación del transformador.

8.2 Análisis de la inductancia no lineal y resistencia de amortiguación

Antes de proceder al análisis de los propios circuitos de supresión, se deben analizar los componentes que estos circuitos tienen, siendo estos una resistencia y una inductancia no lineal. La inductancia debe ser tal que su curva de saturación esté por debajo de la del transformador para que este elemento se sature antes y evite que el núcleo magnético del transformador entre en ferorresonancia. La resistencia debe amortiguar el valor de la ferorresonancia evitando que los valores de tensión se desvíen mucho del que ofrece la fuente de tensión.

Para la creación de esta inductancia se dispone del mismo modelo que se disponía en el interior de los transformadores, por lo que únicamente se deben ajustar los valores de L en la zona saturada y en la zona no saturada.

De manera experimental, mediante el método analítico de ensayo y error, se procede a determinar el valor que deben tener la resistencia de amortiguación y la inductancia no saturada.

8.2.1 Elección de la resistencia

Para la resistencia de amortiguación se utiliza el circuito con interruptor, teniendo en cuenta que al ajustar el valor de R deben cambiar tanto la magnitud de la presencia de la ferorrresonancia como los valores numéricos de las diferentes variables que son medidas.

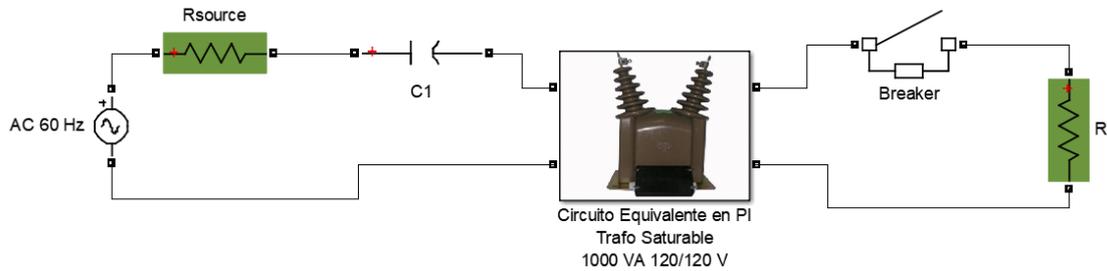


Figura 28. Conexión con interruptor.

Suponiendo inicialmente un valor de 80Ω en la resistencia, y simulando el comportamiento del circuito durante 0,5 segundos se obtiene una tensión en los bornes del secundario tal que:

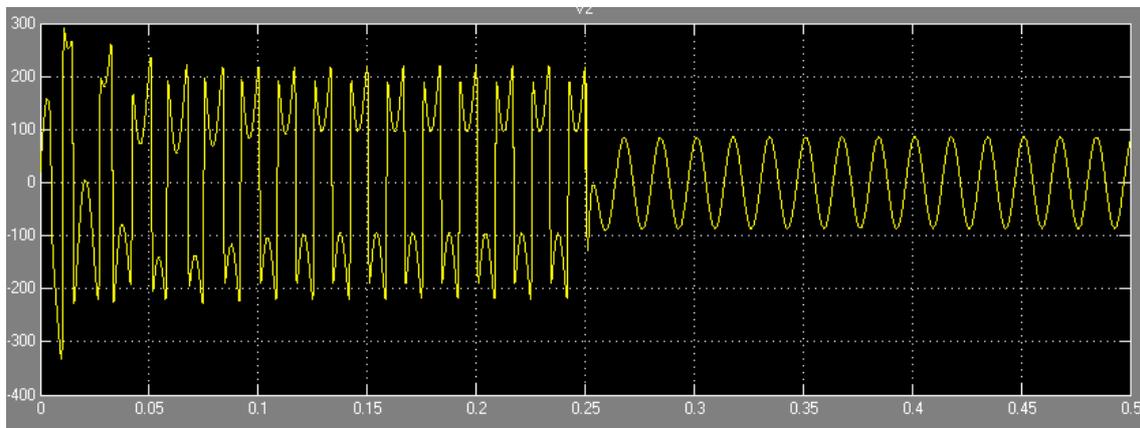


Figura 29. Tensión V2 con 80Ω .

Se puede apreciar que, aunque mitiga la ferorrresonancia correctamente al cerrar el interruptor (en la mitad del tiempo total de simulación, 0,25 segundos), los valores de tensión no llegan al valor de la fuente. Gráficamente se aprecia como la onda llega casi a los 100 V mientras que ésta debería llegar a los $120\sqrt{2}$ (aproximadamente 170 V). Se deberá escoger, por tanto, una resistencia de mayor valor.

Si se utiliza un valor de 210Ω , simulando durante el mismo tiempo, pero observando más detenidamente el intervalo entre 0,2 segundos y 0,4 segundos (lugar donde debería observarse la mitigación de la ferorrresonancia) se obtiene:

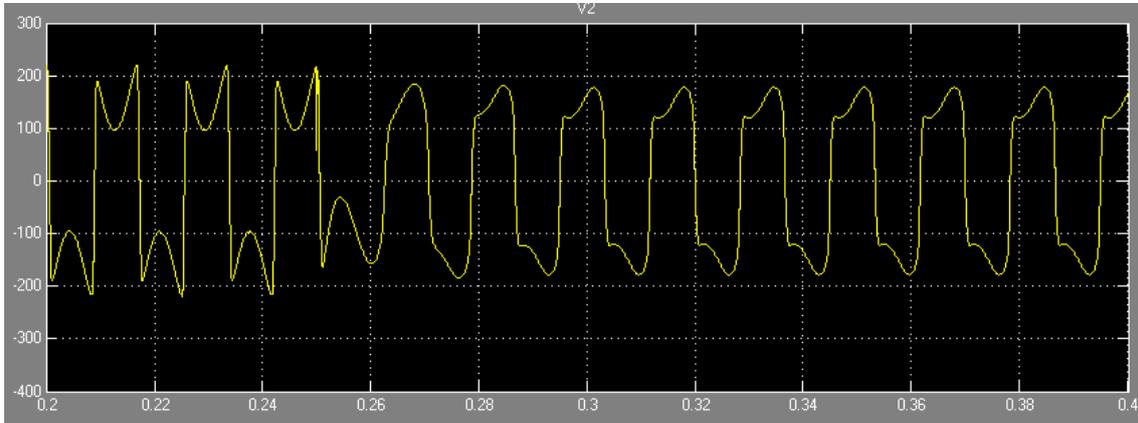


Figura 30. Tensión V2 con 210Ω .

En la figura se observa cómo para este valor de resistencia, el circuito no es capaz de amortiguar la ferorrresonancia, por lo que es necesario coger un valor menor (y a su vez mayor que 80Ω). También cabe destacar la presencia de una sobretensión de aproximadamente de unos 8 V.

Tras realizar varias simulaciones más, se concluye que el valor óptimo de la resistencia para este transformador es de 200Ω , ya que a partir de este valor el circuito no es capaz de controlar fenómeno que se trata de mitigar. De manera gráfica, mostrando las magnitudes de la tensión del secundario entre 0,2 y 0,4 segundos:

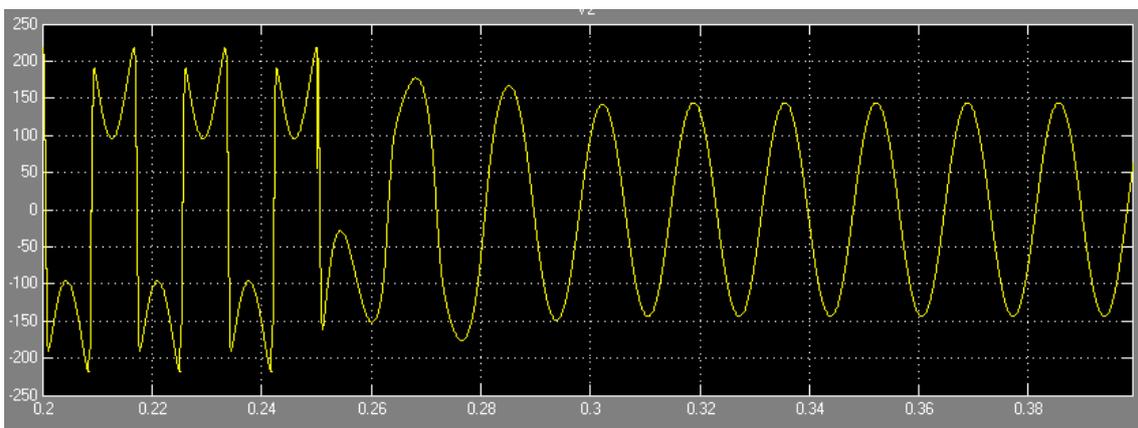


Figura 31. Tensión V2 con 200Ω .

En esta ocasión se tiene que una vez cerrado el interruptor sí se logra amortiguar el fenómeno, aunque los primeros periodos después de cerrar el circuito sigan siendo ferorrresonantes. Sin embargo, se puede apreciar que aún en valores óptimos de resistencia, la tensión es aproximadamente de 150 V, que dista del valor de la fuente (170 aprox.).

8.2.2 Elección de la inductancia no lineal

Para la inductancia no lineal se utiliza el circuito con interruptor magnético, teniendo que ajustar el valor de L en la zona de no saturación para que el circuito no entre en ferorrresonancia. Además este valor de L_{no-sat} permite dibujar la curva de saturación de la inductancia, que debe estar siempre por debajo de la curva de saturación del transformador.

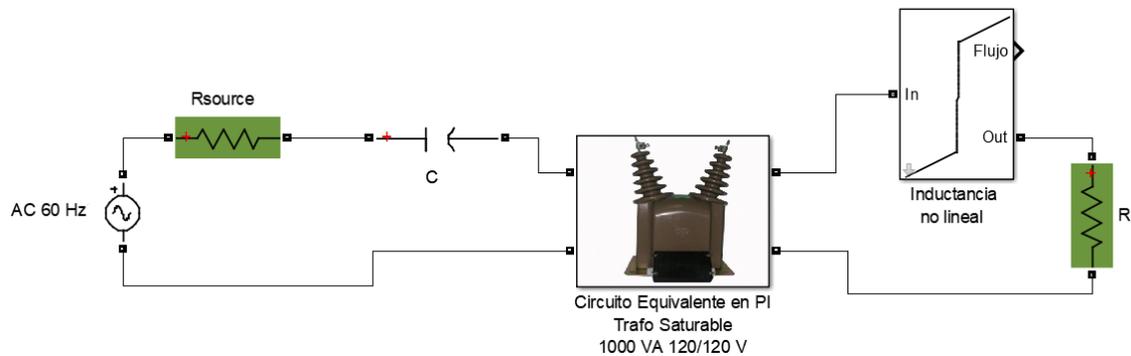


Figura 32. Conexión con interruptor magnético.

En este circuito, la resistencia de amortiguación tiene el mismo valor que el calculado en el apartado anterior (200Ω).

Se comienzan las simulaciones con un valor de $L_{no-sat} = 0,05 H$. En esta ocasión la simulación es de 0,2 segundos, ya que en este circuito, la supresión del fenómeno se realiza desde el comienzo de la simulación ($T = 0 \text{ seg}$). De esta manera se pueden observar mejor los efectos de la posible mitigación. Para la duración mencionada, los valores de la tensión en los bornes del secundario del transformador son:

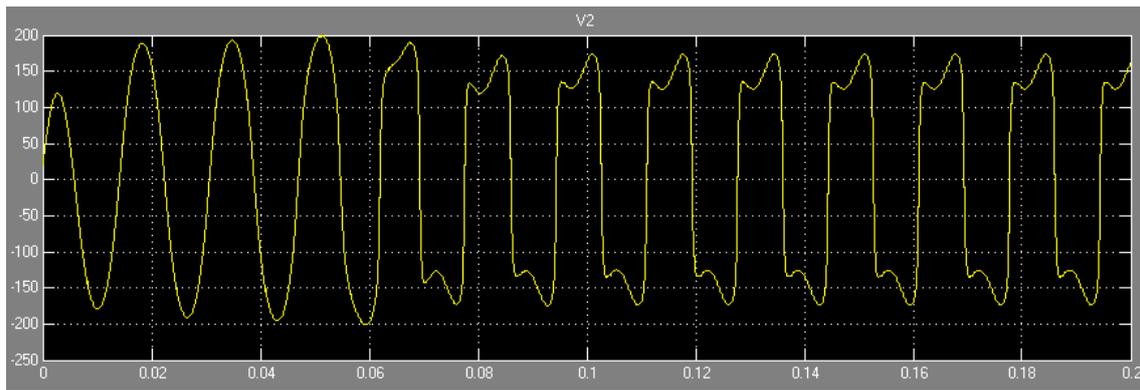


Figura 33. Tensión V_2 con $0,05 H$.

Se aprecia que con este valor de inductancia no se logra amortiguar el efecto de la ferorrresonancia. Además, se produce una sobretensión en el circuito.

Para la segunda simulación el valor de la inductancia es de $L_{no-sat} = 0,01 H$, y los valores de la tensión respecto del tiempo son:

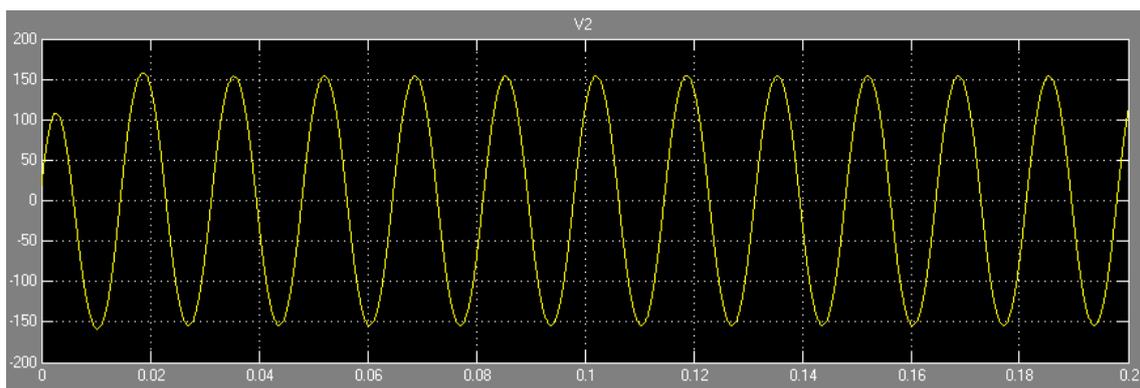


Figura 34. Tensión V_2 con $0,01 H$.

En esta simulación, se consigue la supresión de la ferorrresonancia, sin embargo, los valores de tensión son bastante inferiores a los de la fuente; por lo que es necesario aumentar el valor de la inductancia.

Tras realizar varias simulaciones más, se concluye que el valor óptimo de la inductancia para este transformador es de $L_{no-sat} = 0,025 H$, ya que a partir de este valor el circuito no es capaz de controlar el fenómeno que se trata de mitigar. De manera gráfica, mostrando los valores de la tensión del secundario:

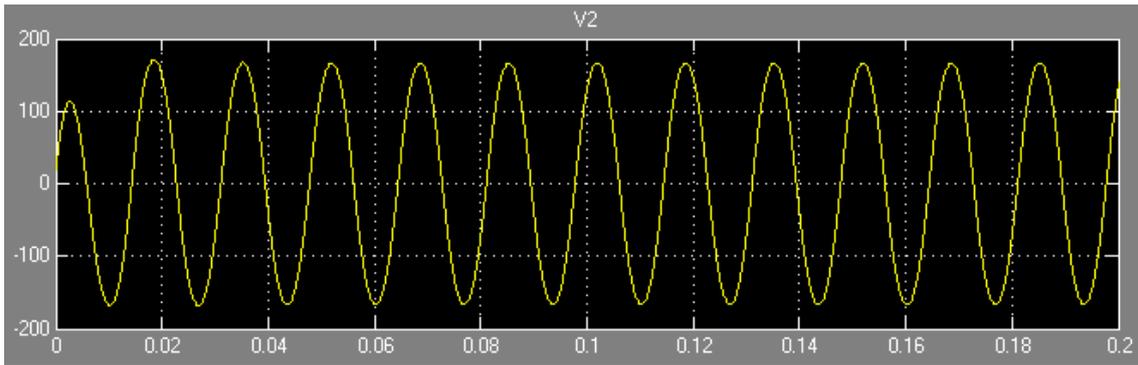


Figura 35. Tensión V2 con 0,025 H.

Con este valor, se amortigua el efecto de la ferorrresonancia, manteniendo unos buenos niveles de tensión (como se aprecia en la siguiente figura).

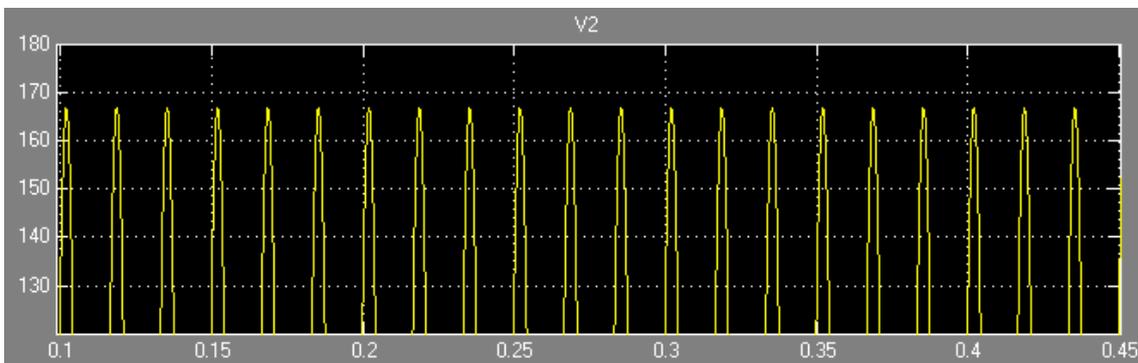


Figura 36. Tensión máxima V2 con 0,025 H.

Los análisis realizados hasta ahora para comprobar la capacidad de amortiguación de los circuitos han sido realizados únicamente con la tensión del secundario del transformador, pero también puede comprobarse analizando que ocurre con las intensidades que circulan en el sistema. Por ejemplo, comparando gráficamente las intensidades en los casos de $L_{no-sat} = 0,025 H$ y $L_{no-sat} = 0,05 H$:

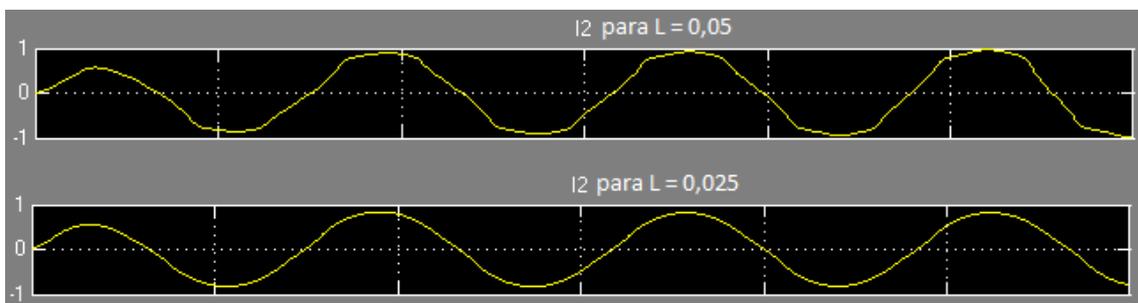


Figura 37. Comparación de intensidades según la inductancia.

Como cabía esperar, en la situación superior se da la ferorrresonancia (al igual que sucedía para la misma inductancia en la tensión), mientras que en la situación inferior no se aprecian signos del fenómeno.

Respecto a la otra condición fundamental que debe cumplir el valor de la impedancia, tener una curva de saturación menor que la del transformador, es una condición que se debe medir para los valores de inductancia experimentados. Sin embargo al realizar la comparación de las curvas en el caso de $L_{no-sat} = 0,05 H$, el resultado ha sido el siguiente:

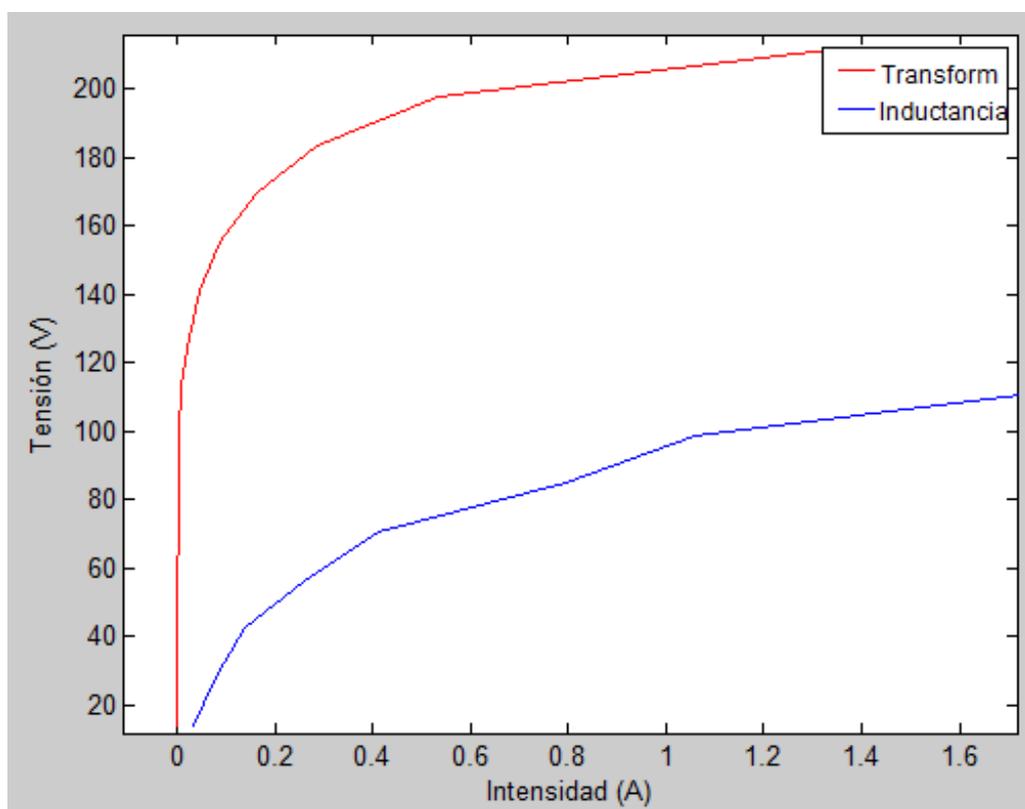


Figura 38. Comparación de curvas de saturación

Como se puede apreciar, la curva de saturación de la inductancia es menor que la del transformador, cumpliendo así con la condición impuesta anteriormente. Para el resto de los valores, la inductancia tiene un valor menor de 0,05 H, situando la curva de saturación de la inductancia aún más por debajo de la que se observa en la gráfica. Es por esto que no es necesario realizar la comprobación para los otros valores de las inductancias.

Una vez obtenidos unos valores óptimos de la inductancia no lineal y de la resistencia de amortiguación, y habiendo simulado el funcionamiento de ambas para los dos circuitos de supresión que se proponen en este trabajo, se pueden comparar los resultados que se obtienen con cada uno y la calidad de estos resultados.

Esta comparación que se realiza, es entre el circuito que tiene conexión con interruptor y el que tiene interruptor magnético, teniendo los valores de resistencia de amortiguación e inductancia no lineal calculados en el apartado anterior.

Dichos circuitos, vistos previamente son:

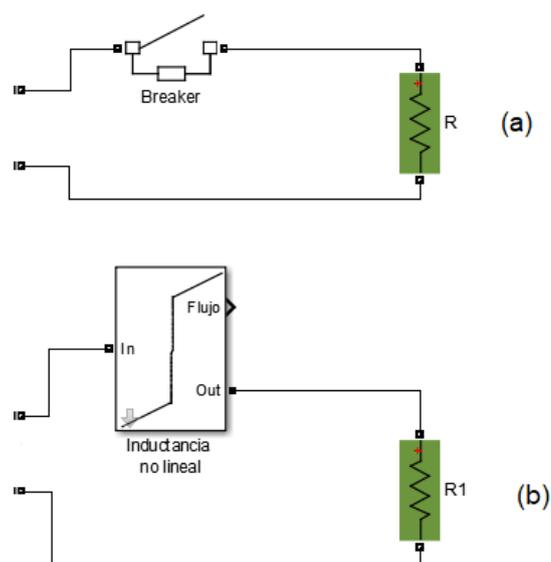


Figura 39. Circuitos de supresión.

La principal diferencia reside en que el circuito con interruptor (a) debe ser activado una vez haya aparecido la ferorrresonancia porque de lo contrario afectaría negativamente al rendimiento del circuito, mientras que el de interruptor magnético (b) actúa únicamente cuando surge la ferorrresonancia, haciendo que el circuito no entre en este estado en ningún momento, manteniendo el circuito en unas condiciones no ferorrresonantes similares.

Otra gran diferencia es que la tensión del circuito (a) no alcanza los niveles de tensión de la fuente, existiendo una diferencia notable entre los mismos. Por su parte, el circuito (b) tiene unos valores mucho más próximos a los de la fuente, siendo la diferencia de tensiones relativamente pequeña. Para apreciar mejor este hecho, se

pueden comparar las tensiones máximas de ambos circuitos respecto del tiempo en la zona en la que mantienen un funcionamiento correcto.

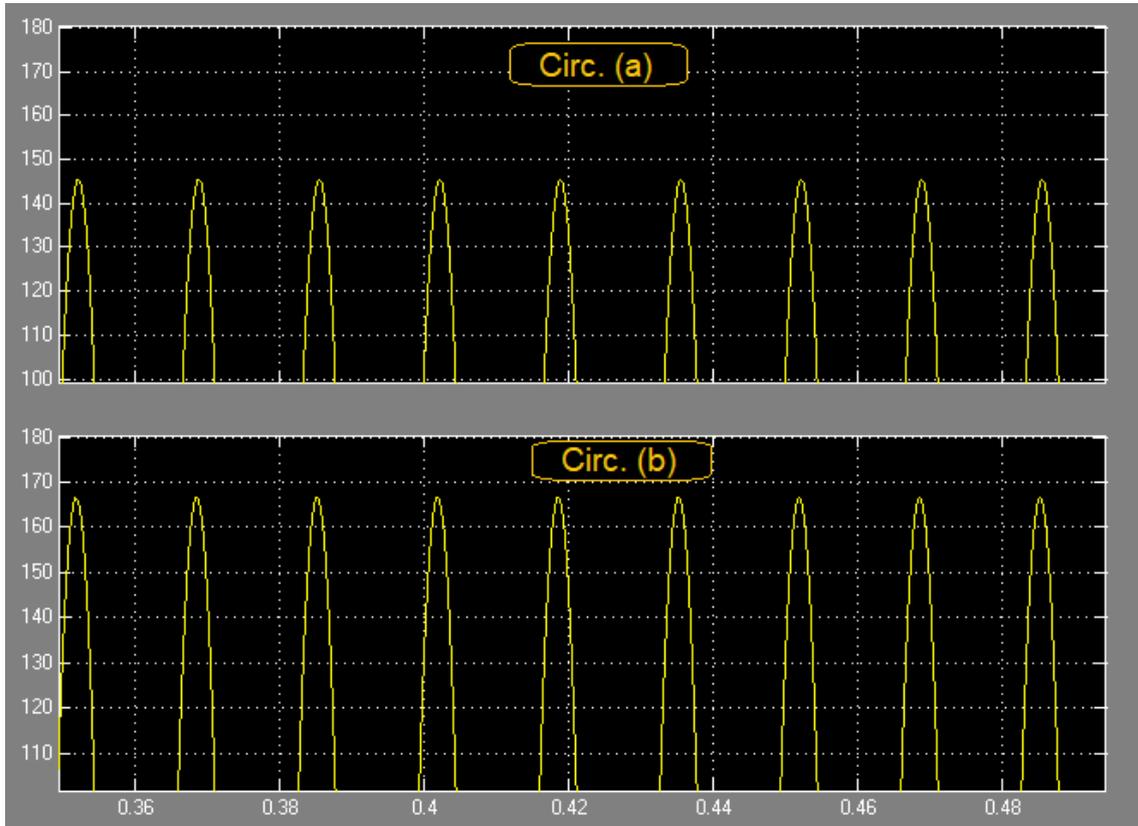


Figura 40. Comparación de tensiones máximas entre circuitos de supresión.

El circuito de conexión mediante interruptor magnético es el que debe montarse en la realidad en el caso en el que se da la ferorresonancia, ya que es capaz de amortiguar el fenómeno de manera autónoma y automática sin afectar al rendimiento del resto del circuito.

9. Descripción de tareas. Gantt

En este apartado se presenta el programa de trabajo seguido durante la realización del TFG. Para ello, ha sido necesario el trabajo conjunto de un ingeniero superior (Director del TFG) y un ingeniero graduado (alumno autor del TFG). El programa de trabajo es el siguiente:

PT.1 Paquete de documentación

- Búsqueda bibliográfica (T.1.1): Comienza el 3 de noviembre, tras una reunión (R.1) el día anterior entre el alumno y el director del TFG donde se le expone al ingeniero graduado las pautas y tareas que se deben realizar para la creación del TFG. Este mismo día 2 de noviembre es por tanto la fecha de comienzo del proyecto (H.0). Esta fase tiene como objetivo buscar información sobre la ferorrresonancia, y la realiza el ingeniero graduado. La tarea termina el 27 de diciembre.
- Redacción del estado del arte (T.1.2): Comienza el 19 de enero, tras terminar los exámenes ordinarios. En esta tarea, el ingeniero graduado debe seleccionar, asimilar y compendiar la información válida que haya adquirido en la tarea anterior para realizar el TFG. Tras esto, sucede la segunda reunión (R.2) entre ingeniero graduado e ingeniero superior, donde el tutor valida la redacción realizada, terminando así la redacción del estado del arte (H.1). Esta segunda tarea finaliza el 14 de febrero.

PT.2 Paquete de simulación

- Creación de los modelos de simulación (T.2.1): Da comienzo el 16 de febrero, tras la redacción del estado del arte y después de una reunión (R.3) donde se esclarecen la metodología y la realización que son necesarias para poder crear los modelos y trabajar con ellos. Esta finalización se da en el día 27 de marzo, día en el que el tutor da su visto bueno a los modelos realizados por el ingeniero graduado (H.2).
- Realización de simulaciones (T.2.2): Comienza el día siguiente que finaliza la tarea de creación de modelos y tiene como fin experimentar con los modelos para analizar los modelos creados y obtener los resultados que son necesarios para lograr los objetivos del trabajo. Una vez hecho esto, da lugar una reunión (R.4) para que el tutor compruebe la vigencia de los resultados y así poder finalizar este segundo paquete el día 3 de mayo (H.3).

PT.3 Paquete de redacción

- Redacción de la memoria (T.3.1): Comienza el 4 de mayo. Se realiza la escritura del documento a entregar. La tarea finaliza el 11 de junio.
- Revisión de la memoria (T.3.2): La tarea comienza el 12 de junio, en ella el director del TFG señala los puntos a revisar en la redacción. Se finaliza la realización de los cambios pertinentes el día 10 de julio, tras lo cual se celebra una reunión (R.5) el día siguiente en la que se da por finalizado el TFG (H.4).

A continuación, se facilita una tabla que reúne las reuniones y los hitos. También se incluye un Diagrama de Gantt que muestra de forma esquemática las tareas que se han seguido en la ejecución de este TFG.

Nombre	Descripción
R.1 Reunión	Asignación del tema y las pautas de trabajo que el ingeniero graduado debe hacer.
H.0 Comienzo TFG	Indica el comienzo del trabajo.
R.2 Reunión	Validación del estado del arte.
H.1 EdA finalizado	Marca la finalización del estado del arte.
R.3 Reunión	Se establecen la metodología y las pautas a seguir para realizar las simulaciones.
H.2 Modelos creados	Los modelos necesarios para la simulación son creados.
R.4 Reunión	Comprobación de la veracidad de los modelos y los resultados.
H.3 Simulaciones finalizadas	Las simulaciones son realizadas de manera exitosa.
R.5 Reunión	Reunión final para revisar la memoria del trabajo.
H.4 TFG finalizado	La memoria está terminada y lista para entregar.

Tabla 5. Lista de reuniones e hitos.

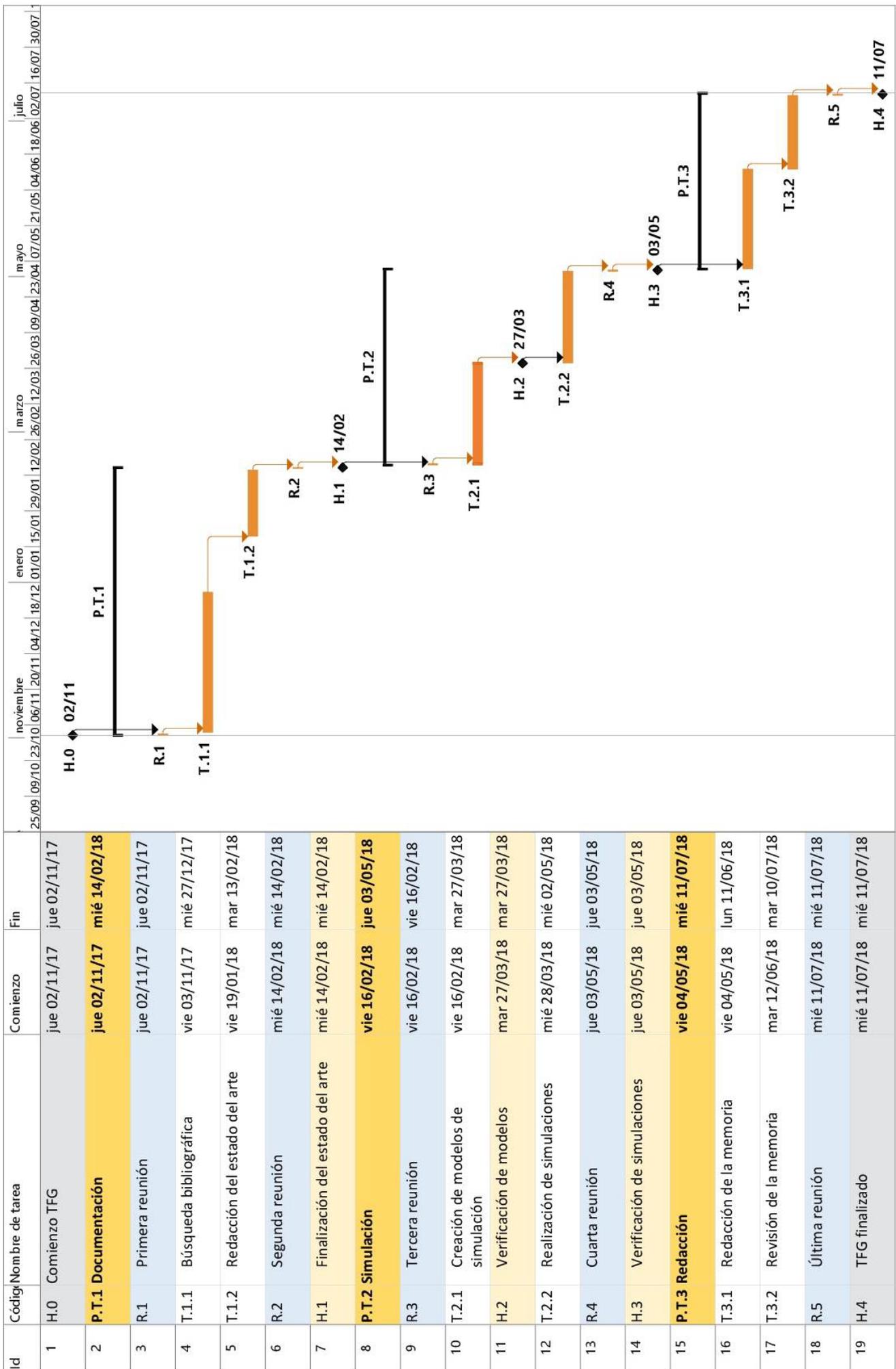


Figura 41. Diagrama Gantt

10. Desglose de gastos

En este apartado se realiza el desglose de gastos necesario para llevar a cabo este TFG. No se presenta un presupuesto por ser un trabajo ya realizado por el alumno, y no un trabajo aún por realizar.

Para presentar este apartado de manera más cómoda, se divide el desglose en las diferentes partidas que lo componen, definiéndolos brevemente y obteniendo su correspondiente coste.

10.1 Horas internas

Tiene en cuenta el trabajo realizado por el equipo, que está compuesto por un Ingeniero Superior (director del TFG) y un Ingeniero Graduado (alumno).

HORAS INTERNAS			
Concepto	Coste unitario	Nº Unidades	Coste total
Ingeniero Superior	60 €/h	20 horas	1200 €
Graduado Ingeniero	30 €/h	200 horas	6000 €
TOTAL			7.200 €

Tabla 6. Desglose: Horas internas

10.2 Amortizaciones

Tiene en cuenta el coste de amortización de los elementos que se han utilizado para desarrollar el TFG. Mediante la relación del coste de adquisición y la vida útil se obtiene el coste unitario.

AMORTIZACIONES				
Concepto	Uso	Coste adquisición	Vida útil	Coste total
Ordenador	200 horas	600 €	5.000 horas	24 €
Licencia Matlab	45 horas	250 €	1.500 horas	7,50 €
Licencia Office	60 horas	69 €	3.500 horas	1,18 €
TOTAL				32,68 €

Tabla 7. Desglose: Amortizaciones

10.3 Gastos

Se consideran los gastos correspondientes al material de oficina requerido para la realización del TFG.

GASTOS	
Concepto	Coste total
Material de oficina	15 €
TOTAL	15 €

Tabla 8. Desglose: Gastos

10.4 Subcontrataciones

Para realizar este trabajo no ha sido necesario realizar ninguna subcontratación.

10.5 Desglose total

Para resumir el coste de todas las partidas y ver cuánto es el coste total:

TOTAL	
Partidas	Coste total
Horas internas	7.200 €
Amortizaciones	32,68 €
Gastos	15 €
Subcontrataciones	-
SUBTOTAL	7.247,68 €
Costes indirectos (4%)	289,91 €
TOTAL	7.537,59 €

Tabla 9. Desglose: Total

Se puede observar que la mayor parte del desglose ocurre en horas internas, siendo la suma de los costes de gastos y de amortizaciones muy inferior a los costes de las horas internas.

11. Conclusiones

En este apartado se presentan las conclusiones que se han obtenido tras realizar este TFG y tras analizar la ferorrresonancia que ocurre en el transformador de tensión en diferentes casos.

Los transitorios electromagnéticos pueden tener efectos muy negativos en los equipos conectados a la red eléctrica, como en el transformador. En concreto la ferorrresonancia varía los valores de intensidad y tensión, conllevando la posibilidad de que se produzca una avería en el sistema. La modelización del transformador con inductancia saturable será de gran ayuda para estudiar y analizar la ferorrresonancia para poder así minimizar los efectos que este fenómeno produce.

Existen muchas maneras de estudiar estos transformadores, pero a lo largo de este trabajo se ha determinado que la forma más óptima es mediante una herramienta software, más concretamente MATLAB y su herramienta Simulink, con las que realizar una interfaz gráfica para modelizar el transformador con inductancia saturable.

En este trabajo se ha diseñado el transformador con inductancia saturable e interruptor como medida para suprimir la ferorrresonancia, para poder ser comparado con los mismos transformador e inductancia en serie y una resistencia como interruptor magnético, observando que esta segunda opción ofrece mejores resultados al tener claras ventajas sobre el primero.

12. Referencias / Bibliografía

- [1] J. Mazón, J. F. Miñambres, M. Á. Zorroza y G. Buigues, Guía de autoaprendizaje de máquinas eléctricas, Madrid: PEARSON EDUCACIÓN S.A, 2008.
- [2] Maxwell, James Clerk (1881), *A treatise on electricity and magnetism*, Vol. II, Chapter III, §530, p. 178. Oxford, UK: Clarendon Press.
- [3] R. Hoerauf and N. Nichols, "Avoiding potential transformer ferroresonant problems in industrial power systems", in *Industrial and Commercial Power Systems Technical Conference, 1989, Conference Record.*, 1989, pp. 61-68.
- [4] D.A.N. Jacobson, "Examples of ferroresonance in a high voltage power system", in IEEE Power Engineering Society General Meeting 2003.
- [5] Ferracci, Philippe, "La ferorresonancia", Schneider, Cuaderno técnico nº 190.
- [6] S. Jazebi, A. Farazmand, B. Perinkolam, and F. de León, "A comparative Study on π and T equivalent models for the analysis of transformer ferroresonance", IEEE Trans. Power Del., vol. 28, no. 1, pp. 526-528, Jan. 2013.
- [7] L. N. Robinson, "Phenomena Accompanying Transmission with Some Types of Star Transformer Connections", American Institute of Electrical Engineers, Transactions of the, vol. XXXIV, pp. 2183-2195, 1915.
- [8] D. A. N. Jacobson, D. R. Swatek, and R. W. Mazur, "Mitigating potential transformer ferroresonance in a 230 kV converter station", in Transmission and Distribution Conference, 1996. Proceedings., 1996 IEEE, 1996, pp. 269-275.
- [9] T. Van Craenenbroeck, D. Van Dommelen, and N. Janssens, "Damping circuit design for ferroresonance in floating power systems", European Transactions on Electrical Power, vol. 10, pp. 155-159, May/June 2000.
- [10] D. Shein and S. Zissu, "Domains of ferroresonance occurrence in voltage transformers with or without damping reactors", in Electrical and Electronics Engineers in Israel, 1995., Eighteenth Convention of, 1995, pp. 1.5.2/1-1.5.2/5.

[11] W. Piasecki, M. Florkowski, M. Fulczyk, P. Mahonen, and W. Nowak, "Mitigating Ferroresonance in Voltage Transformers in Ungrounded MV Networks", *Power Delivery, IEEE Transactions on*, vol. 22, pp. 2362-2369, 2007.

[12] W. Piasecki, M. Stosur, M. Florkowski, M. Fulczyk, and B. Lewandowski, "Mitigating ferroresonance in HV inductive transformers", presented at the International Conference on Power Systems Transients, IPST'09, Kyoto, Japan, 2009.

13. Anexos

13.1 Anexo I. Normativa aplicable

Las normas aplicables para la realización de este Trabajo Fin de Grado son las siguientes:

- IEC 60038 Voltajes estándar
- IEC 60044-2 TMP. Parte2: Transformadores de tensión inductivos
- IEEE Std C62.92.3-1993 Parte3: Sistemas de generadores auxiliares

IEC (International Electrotechnical Commission), en castellano CEI

IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers)

13.2 Anexo II. Planos de conjunto. Esquemas

13.2.1 Simulación de curvas de saturación de inductancia no lineal y transformador

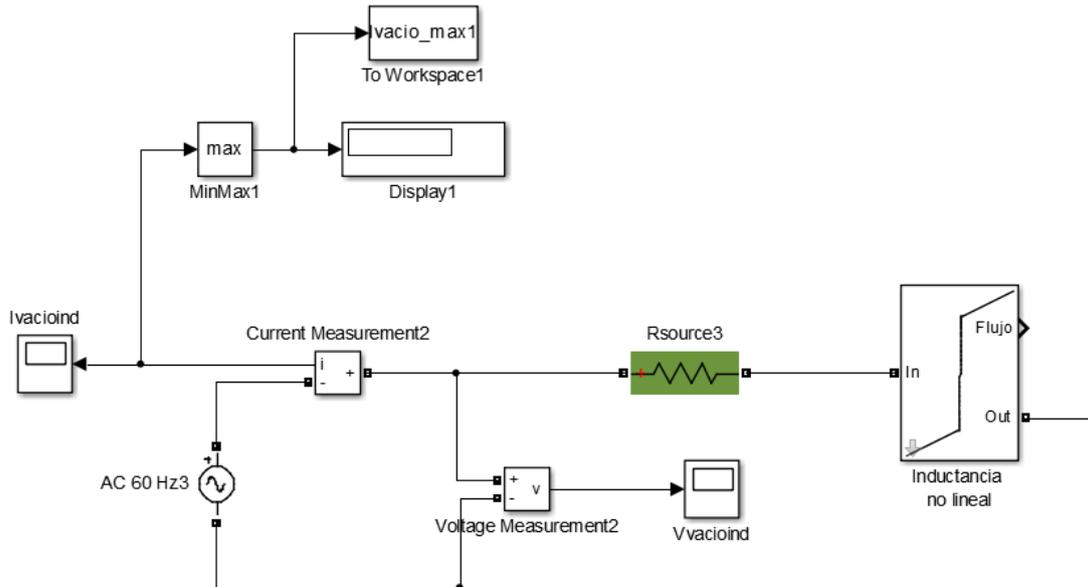


Figura A 1. Mediciones de inductancia en Simulink.

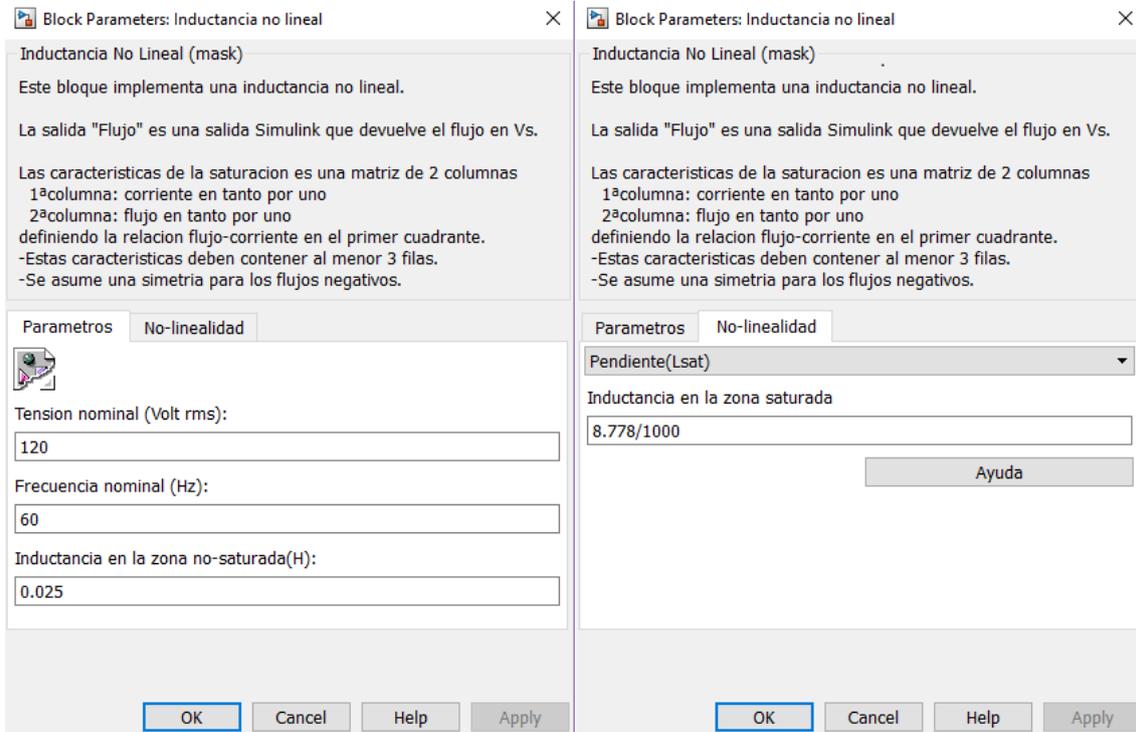


Figura A 2. Valores de la inductancia.

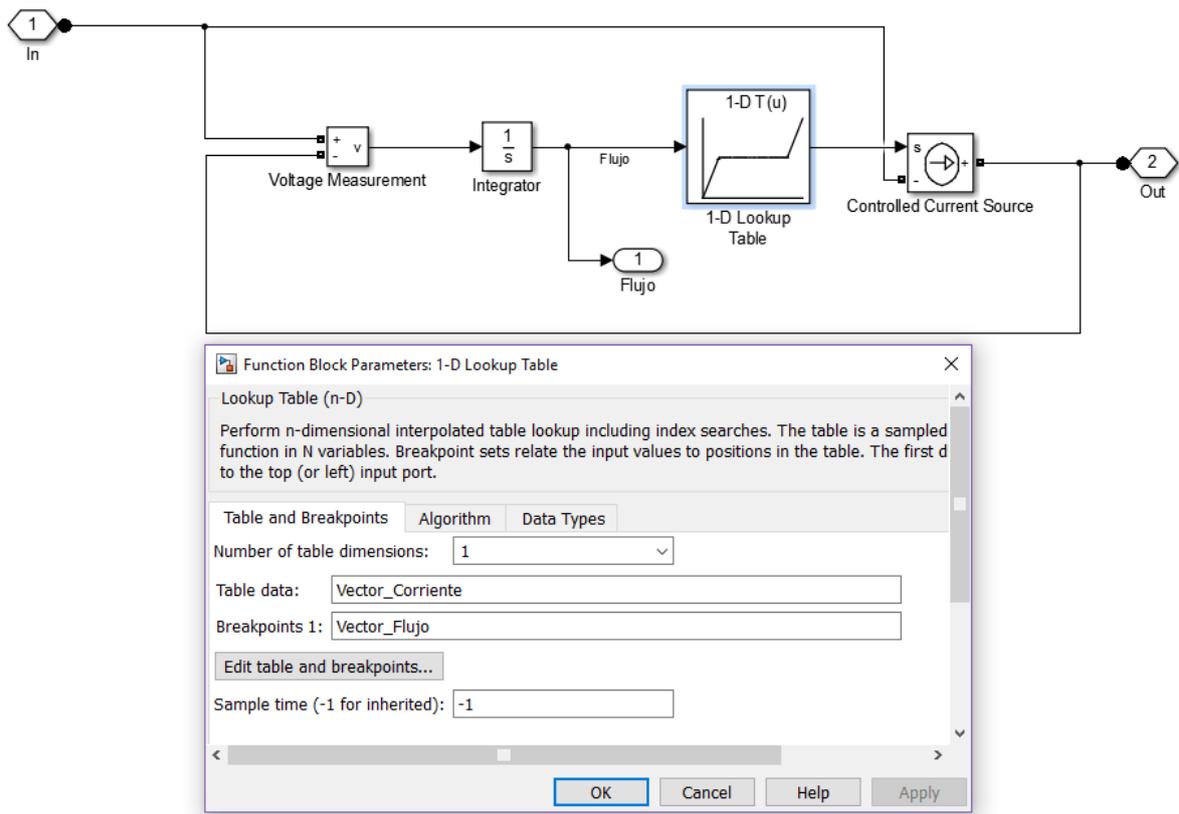


Figura A 3. Programación de bloques de la inductancia

Datos de la fuente de alimentación y de la resistencia de amortiguación:

- Fuente de tensión de valor $V = 120\sqrt{2}$ y de frecuencia 60Hz.
- La impedancia tiene el valor de $R = 0.1444$.

Intensidad (pu)	Flujo (pu)
0	0
0,0119	0,0718
0,0471	0,2121
0,086	0,2819
0,0987	0,3508
0,1268	0,419
0,1747	0,4861
0,2429	0,552
0,2926	0,6165
0,385	0,6795
0,4855	0,7409
0,7481	0,8575
0,9272	0,9126
1,1375	0,9654
1,4001	1,0159
1,6942	1,0634
2,0755	1,1083
2,5354	1,15
3,2082	1,1887
4,3472	1,2231
6,4609	1,252
10,1825	1,2749
16,9401	1,292
30,4139	1,3044
56,1211	1,3133
87,4059	1,3189
112,2701	1,3222
127,4244	1,324
132,671	1,3244
2.224,98	1,9047

Figura A 4. Valores de Intensidad y flujo de la inductancia.

Respecto al transformador:

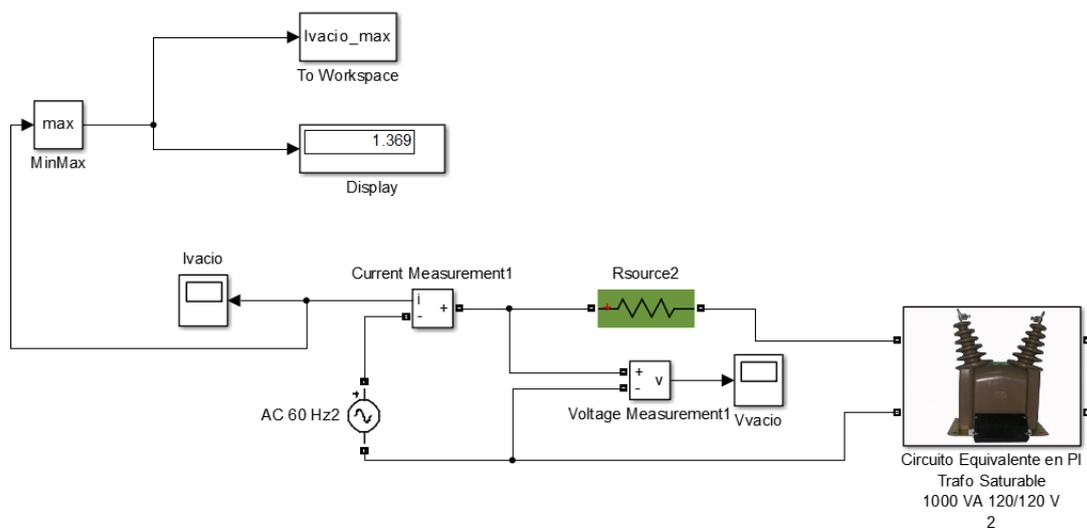


Figura A 5. Mediciones de transformador en Simulink.

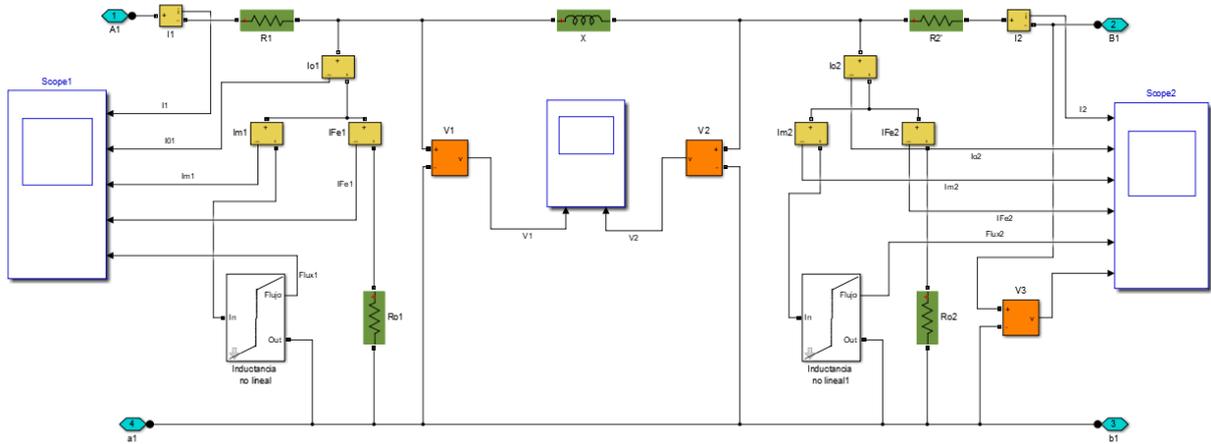


Figura A 6. Distribución Simulink del transformador.

Elemento	Valor
R1 [Ω]	0,306
R2' [Ω]	0,305
X [mH]	8,778
R01 [Ω]	2.149,42
R02 [Ω]	2.149,42

Figura A 7. Valor de los elementos del transformador.

13.2.2 Simulación de circuitos de supresión

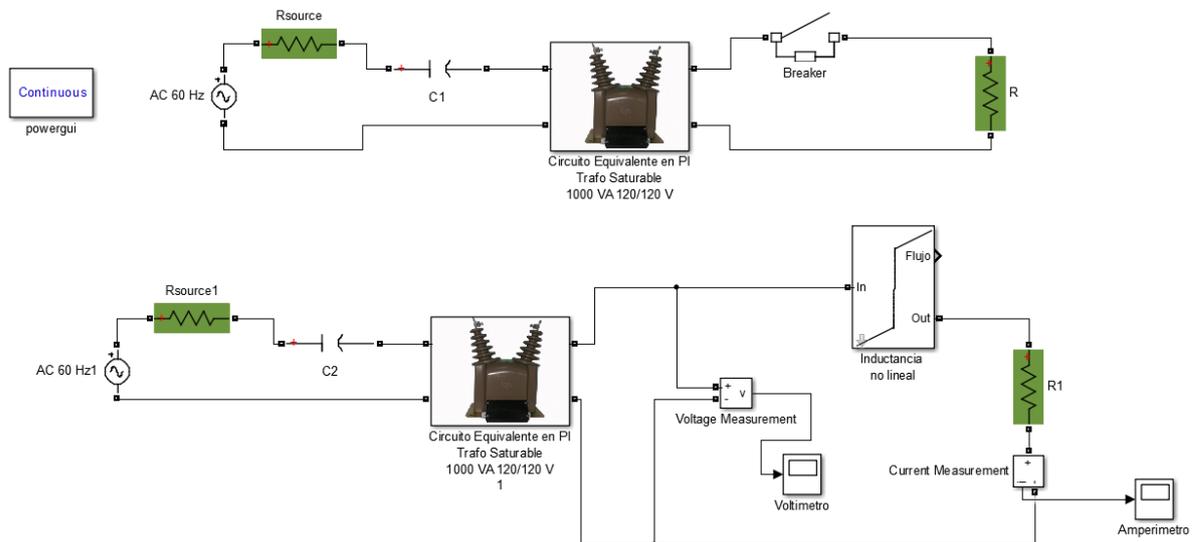


Figura A 8. Circuitos de supresión.

Zona	Valor
No saturada	0,025 (H)
Saturada	8,78 (mH)

Figura A 9. Valores de la inductancia no lineal

13.3 Anexo III. Código

```
Curva_saturacion.m × +
1  %Sirve para introducir la curva de saturacion de la inductancia no-lineal.
2  %Hay que hacerlo antes de ejecutar las simulaciones.
3
4  %I (A) Flujo (Wb)
5  A=[ 0.0992 0
6      0.1024 0.0323
7      0.1119 0.0955
8      0.1224 0.1269
9      0.1258 0.1579
10     0.1334 0.1886
11     0.1463 0.2188
12     0.1647 0.2485
13     0.1781 0.2775
14     0.2030 0.3059
15     0.2301 0.3335
16     0.3009 0.3860
17     0.3492 0.4108
18     0.4059 0.4346
19     0.4767 0.4573
20     0.5560 0.4787
21     0.6588 0.4989
22     0.7828 0.5177
23     0.9642 0.5351
24     1.2713 0.5506
25     1.8412 0.5636
26     2.8446 0.5739
27     4.6666 0.5816
28     8.2994 0.5872
29     15.2306 0.5912
30     23.6656 0.5937
31     30.3695 0.5952
32     34.4554 0.5960
33     35.8700 0.5962
34     600     0.8574];
35
36  A(:,1)=A(:,1)-0.0992;
37  L=1669.60/1000; %mH
38  Vnom=120; %V
39  fnom=60; %Hz
40  Intensidad_base=(Vnom*sqrt(2))/(L*2*pi*fnom); %A
41  Flujo_base=(Vnom*sqrt(2))/(2*pi*fnom); %Wb = V*s
42
43  Ipu=A(:,1)/Intensidad_base;
44  Flujopu=A(:,2)/Flujo_base;
```

Figura A 10. Código de la curva de saturación de la inductancia de los transformadores.

```
Curvasat.m* x +
1  % Permite realizar las curvas de saturación de la inductancia
2  % no lineal y del transformador, y juntarlas en el mismo gráfico.
3  % Curvasat = curva del transformador.
4  % Curvasat1 = curva de la inductancia.
5  % analisis corresponde a los diagramas Simulink que aparecen en
6  % las figuras A1 y A5.
7
8  curvasat=[]
9  curvasat1=[]
10 i=1
11 for V=10:10:150
12     Vmax=V*sqrt(2);
13     sim('analisis')
14     Ivacio_max
15     Ivacio_max1
16     curvasat(i,:)=[Vmax,Ivacio_max]
17     curvasat1(i,:)=[Vmax,Ivacio_max1]
18     i=i+1
19 end
20 plot(curvasat(:,2),curvasat(:,1),'r')
21 hold on
22 plot(curvasat1(:,2),curvasat1(:,1),'b')
```

Figura A 11. Código para visualizar las curvas de saturación de transformador e inductancia.