

GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍA
INDUSTRIAL

TRABAJO FIN DE GRADO

***CÁLCULO Y ANÁLISIS DEL EFECTO
FERRANTI EN TRANSFORMADORES***

Alumno: Sedano Mattheus, Iker

Director: Valverde Santiago, Víctor

Curso: 2017-2018

Fecha: En Bilbao, 20 de junio de 2018

DATOS BÁSICOS DEL TRABAJO FIN DE GRADO

- Alumno: Sedano Mattheus, Iker.
- Director: Valverde Santiago, Víctor.
- Departamento: Ingeniería Eléctrica.

- Título del Trabajo: Cálculo y Análisis del Efecto Ferranti en Transformadores.
- Resumen: El objetivo principal de este trabajo es analizar el Efecto Ferranti y calcular su aparición variando las condiciones de carga y los parámetros de diseño del transformador. Para ello se desarrollará una interfaz gráfica de usuario en Matlab que permite introducir los parámetros de diseño del transformador y las condiciones de carga y, en base a dichos valores calcular el desfase a partir del cual se produce el Efecto Ferranti.
- Palabras clave: Efecto Ferranti, transformador, condiciones de carga, parámetros de diseño del transformador, interfaz gráfica.

- Izenburua: Ferranti Efektuaren Kalkulu eta Análisisa Transformadoreetan.
- Laburpena: Lan honen helburu nagusia Ferranti Efektua aztertzea eta honen agerpena kalkulatzeko da, karga egoera eta transformadorearen diseinu parametro desberdinen arabera. Horretarako Matlaben erabiltzaile interfaze grafiko bat garatuko da transformadorearen diseinu parametroak eta karga egoera sartzea ahalbidertzeko duena, zeinetan balio hauen bidez Ferranti Efektua sorrazten duen desfasea kalkulatu den.
- Hitzgakoak: Ferranti Efektua, transformadorearen diseinu parametroa, interfaze grafikoa, karga egoera, transformadorea.

- Title: Calculation and Analysis of the Ferranti Effect in Transformers.
- Abstract: The main goal of this project is to analyze the Ferranti Effect and calculate its appearance by varying the load conditions and the design parameters of the transformer. For this purpose, a graphical user interface will be developed in Matlab that allows to introduce the design parameters of the transformer and the load conditions and, based on these values, calculate the phase shift from which the Ferranti Effect is produced.
- Keywords: Ferranti Effect, design parameters of the transformer, load conditions, graphical interface, transformer.

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN.....	7
2. CONTEXTO	8
2.1. SISTEMA ELÉCTRICO DE POTENCIA.....	8
2.2. EL TRANSFORMADOR.....	9
2.3. CAÍDA DE TENSIÓN Y EFECTO FERRANTI EN TRANSFORMADORES	10
3. OBJETIVOS Y ALCANCE	12
4. BENEFICIOS DEL PROYECTO.....	13
4.1. BENEFICIOS TÉCNICOS	13
4.2. BENEFICIOS ECONÓMICOS	13
4.3. BENEFICIOS SOCIALES.....	14
5. ESTADO DEL ARTE	15
5.1. TRANSFORMADOR DE POTENCIA MONOFÁSICO.....	15
5.1.1. Principio de funcionamiento.....	16
5.2. TRANSFORMADOR DE POTENCIA MONOFÁSICO REAL EN CARGA	17
5.3. CIRCUITO EQUIVALENTE DEL TRANSFORMADOR.....	18
5.4. CIRCUITO EQUIVALENTE SIMPLIFICADO DEL TRANSFORMADOR.....	21
5.4.1. Transformador conectado a carga inductiva.....	22
5.4.2. Transformador conectado a carga capacitiva	23
5.5. CAÍDA DE TENSIÓN. COEFICIENTE DE VARIACIÓN DE TENSIÓN.....	23
5.5.1. Método gráfico de Kapp	24
5.6. EFECTO FERRANTI.....	26
5.6.1. Calculo del ángulo capacitivo de Ferranti.....	27
6. ANÁLISIS DE ALTERNATIVAS	28
6.1. TÉCNICAS DE CARÁCTER CORRECTIVO, PREVENTIVO Y PREDICTIVO	28
6.1.1. Técnicas de carácter correctivo.....	28
6.1.2. Técnicas de carácter preventivo.....	28
6.1.3. Técnicas de carácter predictivo.....	29
6.2. ANÁLISIS DE ALTERNATIVAS PARA EL ESTUDIO DEL EFECTO FERRANTI.....	29
6.2.1. Pruebas de campo.....	30
6.2.2. Modelos físicos a escala.....	30
6.2.3. Simulación software	30
6.2.4. Criterios de selección.....	30
6.2.5. Conclusión del análisis.....	31
6.3. ELECCIÓN DE LA HERRAMIENTA SOFTWARE	33
6.3.1 Mathcad	33
6.3.2. MATLAB (Matrix Laboratory) – GUIDE (Graphical User Interface Development Environment).....	33
6.3.4. ATP (Alternative Transients Program).....	33
6.3.5. PSCAD/EMTDC.....	33
6.3.6. Criterios de selección.....	34
6.3.7. Conclusión del análisis.....	34
7. DESCRIPCIÓN DE LA SOLUCIÓN	36
7.1. BREVE INTRODUCCIÓN A GUIDE	36

7.2. INTERFAZ GRÁFICA DE USUARIO	37
7.2.1. Módulo 1: Datos del transformador monofásico	39
7.2.2. Módulo 2: Gráfico índice de carga frente ángulo Ferranti	40
7.2.3. Módulo 3: Datos de la carga.....	40
7.2.4. Módulo 4: Resultados	43
7.2.5. Mensajes de error.....	44
7.2.6. Opción "Salir"	46
8. EJEMPLOS DE APLICACIÓN.....	47
8.1. EJEMPLO DE APLICACIÓN 1	47
8.2. EJEMPLO DE APLICACIÓN 2.....	50
9. DESCRIPCIÓN DE TAREAS, DIAGRAMA GANTT	52
10. PARTIDAS PRESUPUESTARIAS.....	54
11. CONCLUSIONES.....	55
12. REFERENCIAS	56
13. ANEXO I. CÓDIGO DEL MÓDULO 2	57
14. ANEXO II. CÓDIGO DEL MÓDULO 4.....	60

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Esquema del Sistema Eléctrico de Potencia	9
Figura 2. Transformador de potencia	10
Figura 3. Partes activas de un transformador de potencia (1).....	15
Figura 4. Transformador real en carga (1).	17
Figura 5. Representación del transformador real en carga (1).....	19
Figura 6. Circuito equivalente de transformador monofásico conectado a carga (1).....	20
Figura 7. Diagrama vectorial del transformador real en carga (1).	20
Figura 8. Circuito equivalente simplificado (1).....	21
Figura 9. Circuito equivalente simplificado práctico del transformador (1).....	22
Figura 10. Diagrama vectorial simplificado (Carga inductiva) (1).....	22
Figura 11. Diagrama vectorial simplificado (carga capacitiva): efecto Ferranti (1).....	23
Figura 12. Caída de tensión ante carga inductiva (1).....	24
Figura 13. Método de Kapp (1).....	25
Figura 14. Entorno de creación de la interfaz gráfica	36
Figura 15. Apariencia de la interfaz gráfica de usuario.	37
Figura 16. Diagrama de flujo de la interfaz gráfica (elaboración propia).....	38
Figura 17. Módulo 1: Datos del transformador monofásico.	39
Figura 18. Módulo 2: Gráfico índice de carga frente ángulo Ferranti.....	40
Figura 19. Módulo 3: Datos de la carga.....	41
Figura 20. Módulo 4: Resultados.....	43
Figura 21. Mensaje de error para índices de carga no acotados entre 0 y 1.	44
Figura 22. Mensaje de error para factores de potencia no acotados entre 0 y 1.	45
Figura 23. Mensaje de opción "Salir".	46
Figura 24. Ejemplo1: Datos del transformador y gráfico.....	47
Figura 25. Ejemplo 1: Datos de carga inductiva	48
Figura 26. Ejemplo 1: Resultado para carga capacitiva.....	49
Figura 27. Vista general de la interfaz para el ejemplo 1 y carga capacitiva.....	49
Figura 28. Ejemplo 2: Carga inductiva.....	50
Figura 29. Ejemplo 2: Carga capacitiva.	51
Figura 30. Diagrama de Gantt.....	53

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Valoración del análisis de alternativas	32
Tabla 2. Valoración de las distintas herramientas para el desarrollo del simulador software.	34
Tabla 3. Descripción de los elementos del Diagrama Gantt	53
Tabla 4. Partida de horas internas	54
Tabla 5. Partida de amortizaciones.....	54
Tabla 6. Partida de gastos	54
Tabla 7. Resumen del presupuesto.	54

1. INTRODUCCIÓN

Este documento contiene el desarrollo del Trabajo Fin de Grado (TFG) con el título *Cálculo y Análisis del Efecto Ferranti en Transformadores*. Para ofrecerle al lector una idea aproximada sobre los conceptos que se tratarán en este TFG en primer lugar, se desarrollarán el contexto del trabajo, los objetivos y alcances del mismo y los beneficios esperados con el desarrollo de la interfaz gráfica que se presenta en este proyecto.

A continuación, se tratará el estado del arte apartado donde se profundizará en el fenómeno a discutir, en este caso el Efecto Ferranti en los transformadores. Se expondrán todas las condiciones de carga a las que se le puede someter un transformador demostrando la caída de tensión en cada uno de los casos e indicando en cuál de ellos se produce el Efecto Ferranti. En el estado del arte también se obtendrá la formulación necesaria para el desarrollo de la interfaz gráfica en Matlab.

En el análisis de alternativa se presentan las distintas alternativas encontradas para el desarrollo de la interfaz explicando las ventajas y desventajas de cada uno de ellos. Finalmente, se expondrá el software seleccionado para el desarrollo de la interfaz gráfica explicando el porqué de dicha selección.

El objetivo final es programar una interfaz gráfica de usuario que permita determinar el ángulo de la carga capacitiva para el cual se produce efecto Ferranti frente a distintas condiciones de carga. Por esto en la descripción de la solución se expone detalladamente como se ha desarrollado la interfaz gráfica explicando los módulos que forman el programa y para qué sirve cada uno de ellos.

En el apartado de resultados se proponen varios ejemplos para mostrarle al lector como es el funcionamiento de dicho programa y así observar cómo actúa un transformador monofásico ante la variación de las condiciones de carga.

En este Trabajo Fin de Grado también se ha realizado un presupuesto en el que se engloba la inversión necesaria para la realización del proyecto. Para explicar las tareas que se han llevado a cabo y el orden de ejecución del TFG se ha elaborado un diagrama de Gantt.

Por último, tras el análisis del efecto estudiado en cuestión y el desarrollo de la interfaz gráfica que permite observar el comportamiento de un transformador ante este efecto, se exponen las conclusiones a modo de síntesis de la información obtenida y resumir el proceso llevado a cabo en la elaboración de este TFG.

2. CONTEXTO

El presente Trabajo Fin de Grado (TFG) se ha realizado en la Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Bilbao dentro del departamento de Ingeniería Eléctrica y trata sobre el desarrollo de una interfaz gráfica de usuario que permite conocer si se produce efecto Ferranti o no en los transformadores monofásicos dependiendo de la carga conectada.

2.1. Sistema Eléctrico de Potencia

Se conoce con el nombre de Sistema Eléctrico de Potencia al conjunto de equipos e instalaciones que posibilitan el uso de la energía eléctrica a gran escala. La generación, el transporte, la distribución y el consumo son las cuatro partes fundamentales del Sistema Eléctrico de potencia. Cada una de las partes tienen distintos niveles de tensión, pero las cuatro a frecuencia constante (50 Hz en Europa y 60 Hz en América) constituyen un sistema trifásico de tensiones (1).

La generación se produce en las centrales eléctricas, éstas son las que producen la energía eléctrica a grandes escalas. Las centrales de generación se clasifican en función de la fuente primaria que utilicen para la generación de energía eléctrica que pueden ser: hidroeléctricas, térmicas, nucleares, eólicas, solares, etc (1).

Normalmente la generación se produce lejos de los núcleos de consumo y aquí es donde entra en juego la red de transporte y distribución. Con red de transporte se suele indicar la transferencia de energía eléctrica a grandes distancias, de las centrales de generación a los núcleos de consumo (ciudades, complejos industriales, ...). El transporte se realiza en líneas de alta tensión igual o superior a 220kV. La distribución se lleva a cabo dentro de los núcleos de consumo mediante líneas de tensión inferiores que proporcionan electricidad a los consumidores. Tanto el transporte y la distribución se realizan mediante líneas aéreas, excepto en los núcleos urbanos, aquí la distribución se lleva a cabo mediante líneas subterráneas. Una vez en los centros de consumo, se adapta la energía recibida a las diferentes características de cada centro (urbano, industrial, etc.).

Los diferentes cambios de tensión que se dan en el Sistema Eléctrico de Potencia para adecuar la energía a cada etapa se realizan mediante una máquina eléctrica de corriente alterna: el transformador.

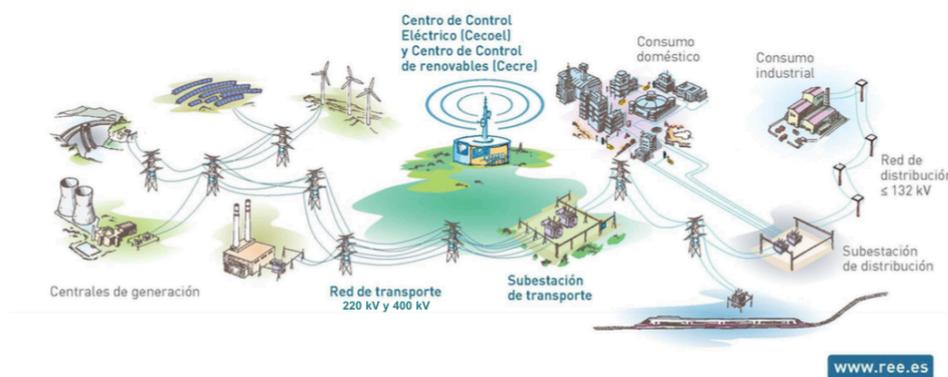


Figura 1. Esquema del Sistema Eléctrico de Potencia.

(Fuente: Red Eléctrica de España)

2.2. El Transformador

De los inventos relacionados con la energía eléctrica el transformador es probablemente uno de los dispositivos más útiles. El transformador está formado por un circuito magnético y dos devanados eléctricos. Por el lado que recibe la energía se denomina devanado primario (aquel por el cual se alimenta el transformador) y devanado secundario aquel al cual se conecta la carga (lado por donde entrega la energía).

La necesidad de emplear transformadores se debe a las siguientes razones. Por una parte, a veces es conveniente separar el circuito de alimentación del circuito de utilización de la energía, ya sea por la puesta a tierra en uno u otro, ya sea para aislar el segundo contra las altas tensiones a las que puede encontrarse el primero. Haciendo uso de un transformador, se consigue fácilmente el objetivo de separación. Por otra parte, también pueden ser utilizados para la medición de intensidades y voltajes en una línea de alta tensión. Conviene a toda costa aislar de ella los instrumentos que deben de ir montados en un cuadro accesible al personal de maniobra. El transformador permite separar el circuito de los aparatos de medida respecto a la red de alta tensión (2).

Pero la posibilidad esencial de los transformadores, por la cual son tan imprescindibles en el Sistema Eléctrico de Potencia, es la de modificar los factores (tensión e intensidad) de la potencia eléctrica transmitida, adaptándolos a las condiciones óptimas que se precisen: tensiones elevadas y bajas intensidades para el transporte de energía a grandes distancias; tensiones e intensidades medias para la distribución a los centros de consumo, y voltajes reducidos e intensidades considerables

en las redes de consumo inmediato. Todo ello, con un rendimiento que supera al de cualquier otra clase de aparatos donde intervengan transformaciones de energía de la naturaleza que fuere: mecánica, térmica, química, eléctrica inclusive (2).



Figura 2. Transformador de potencia.

2.3. Caída de tensión y efecto Ferranti en transformadores

Alimentando un transformador de potencia por su devanado primario a una tensión dada, por efecto de las resistencias internas de los bobinados del transformador, la tensión de salida en el devanado secundario diferirá con respecto a la tensión en vacío del secundario (la tensión de salida del transformador si este no está conectado a ninguna carga y considerando que los bobinados del transformador son de resistencia nula). A esta diferencia aritmética entre ambas tensiones es lo que se denomina caída de tensión. Se suele expresar de forma porcentual. Dependiendo de si la carga es inductiva, resistiva o capacitiva el valor real de la tensión de salida será un porcentaje mayor o menor con respecto a la tensión efectiva del secundario.

En general, las cargas conectadas al secundario de los transformadores tienen factores de potencia inductivos, y en estos casos la tensión en bornes del secundario es menor en carga que en vacío. Sin embargo, existen situaciones excepcionales, como es por ejemplo un transformador que alimenta una línea de transmisión larga sin ninguna carga conectada en el extremo final de esta, donde la agrupación de capacidades parasitas a tierra de los conductores de la línea hace que en su conjunto el devanado secundario del transformador aparezca cargado con una impedancia capacitiva con la intensidad que circula el devanado secundario no nula (3). Cuando esto ocurre la tensión de salida del devanado secundario supera su tensión en vacío, lo que se denomina **efecto Ferranti**. Se pueden llegar a producir sobretensiones muy acusadas por encima de la tensión asignada pudiendo llegar a causar daños en diversos elementos de los

transformadores como los aislamientos ya que estos están sometidos a esfuerzos eléctricos mayores de lo permitido.

El efecto Ferranti no es exclusivo de los transformadores de potencia, también ocurre en otras máquinas eléctricas y en líneas de transmisión. De hecho, la primera vez que se observó el efecto Ferranti fue en la instalación de una línea subterránea de 10.000 voltios en Reino Unido en 1887 por Sebastian Ziani de Ferranti.

3. OBJETIVOS Y ALCANCE

El objetivo fundamental de este Trabajo Fin de Grado es el desarrollo de una interfaz gráfica en MATLAB para determinar si ante unas condiciones de carga determinadas la caída de tensión de un transformador y si este sufrirá efecto Ferranti o no.

Para complementar este objetivo principal se presentan otros objetivos que se logran con el desarrollo del proyecto:

- Analizar y estudiar cómo evoluciona la caída de tensión de un transformador en función de sus características y sus condiciones de funcionamiento.
- Analizar y estudiar diferentes situaciones de funcionamiento del transformador en el que se produzca el efecto Ferranti.
- Analizar y estudiar el método gráfico de Kapp del que se obtendrá una formulación para determinar a partir de que factor de potencia de la carga capacitiva se produce efecto Ferranti.
- Programar tanto la formulación de caída de tensión como la obtenida para el efecto Ferranti en MATLAB para obtener una interfaz de simulación fiable, con el fin de utilizarlo ante necesidades futuras en labores de instalación de transformadores monofásicos o labores de mantenimiento de estos.
- Optimizar los recursos, tanto humanos como materiales, a la hora de detectar el efecto Ferranti en transformadores.
- Reducir los tiempos empleados a la hora de estudiar si se produce el efecto Ferranti en transformadores utilizando la interfaz diseñada. Si necesidad de manipular ningún otro aparato de medida en el transformador.

Otros objetivos más personales serían profundizar en el manejo de MATLAB y en concreto en el uso de Guide, el programa utilizado para el desarrollo de la interfaz gráfica. Y por otro lado profundizar en el conocimiento de los transformadores de potencia.

4. BENEFICIOS DEL PROYECTO

Los beneficios que se van a obtener con la implantación de este proyecto se pueden clasificar en técnicos, económicos y sociales. Debido a las características técnicas del proyecto los beneficios más importantes son los técnicos de los cuales derivan tanto los beneficios económicos como los sociales.

4.1 Beneficios técnicos

Red Eléctrica de España es el organismo encargado de cubrir la demanda de energía eléctrica en España controlando la generación de los distintos centros generadores como supervisando el correcto funcionamiento de la red de transporte. Son los encargados de que el suministro eléctrico sea de calidad, fiable y seguro.

El efecto Ferranti supone un inconveniente tanto para las líneas de transmisión como para los transformadores de potencia. Son dos elementos imprescindibles para el correcto funcionamiento de todo el sistema eléctrico, por lo tanto detectar el efecto Ferranti es fundamental.

Localizando el efecto Ferranti antes de que se vaya a producir evita que la máquina trabaje a un valor superior de su tensión e intensidad nominal, lo cual ahorraría daños y averías. La interfaz desarrollada en este proyecto permite la detección del efecto Ferranti introduciendo los datos nominales del transformador monofásico y sus condiciones de carga. Permite hacer el estudio sin tener que intervenir en el transformador. El conjunto de desventajas que se logra evitar con una correcta prevención y actuación frente a los factores que producen el efecto Ferranti se traducen en una mejora de las condiciones de funcionamiento, un aumento de la vida útil del transformador y una mejor calidad del servicio eléctrico. Lo cual reduce los costes técnicos (entre otros) que serán necesarios dedicar para alcanzar los ya mencionados niveles de calidad y fiabilidad del suministro de energía eléctrica a la población.

4.2. Beneficios económicos

El hecho de poder detectar el efecto Ferranti mediante una herramienta sencilla, rápida e intuitiva supone un ahorro económico frente a la solución de ensayos de campo. Además, disponer de una herramienta de análisis reduce la cantidad de recursos materiales y humanos necesarios.

Las labores de mantenimiento, la sustitución de componentes o maquinaria dañada, o el recambio de elementos que pueden poner en peligro el correcto funcionamiento de la máquina y de todo el sistema, así como su capacidad para seguir operando adecuadamente suponen una alta inversión de recursos económicos. Por eso

tener la capacidad de poder predecir un aumento de tensión por encima del valor nominal debido al efecto Ferranti evitaría el deterioro de los distintos elementos que componen el transformador. Y supondría una notable reducción del gasto económico que supone realizar los recambios de dichos elementos.

Por lo tanto, disponer de una herramienta que permita realizar un diseño adecuado de los transformadores para evitar que se produzca en ellos el efecto Ferranti se traduce en un ahorro de mantenimiento y prevención posterior. En definitiva, un ahorro en recursos económicos.

4.3. Beneficios sociales

Los usuarios de la red eléctrica demandan un suministro eléctrico que sea seguro, fiable y de calidad. Los usuarios son los que conectan diversos dispositivos a la red, los cuales están diseñados para trabajar a ciertos niveles de tensión e intensidad. Si éstos niveles son superados no se garantiza que los distintos aparatos vayan a funcionar correctamente.

El hecho de poder detectar el efecto Ferranti antes de que se produzca es una gran ventaja tanto para los fabricantes de transformadores como para los diseñadores de la red. Éstos pueden idear y aplicar medidas que eviten el efecto Ferranti antes de que se produzca, diseñando transformadores adecuados para estados de carga concretos o introduciendo diferentes medidas en la red para evitar cargas muy capacitivas que eleven la tensión del secundario por encima de su valor nominal.

El hecho de poder detectar el efecto Ferranti mediante la aplicación desarrollada en este trabajo permite una correcta implementación de medidas que eviten dicho efecto. Lo que finalmente se traduce en asegurar la calidad y continuidad del suministro eléctrico y la mejora en la explotación de la red de transporte y distribución; mejora que deriva en los usuarios de la red eléctrica y en el correcto funcionamiento de los aparatos eléctricos conectados a la red.

5. ESTADO DEL ARTE

Con el fin de desarrollar una interfaz gráfica fiable para calcular la caída de tensión en los transformadores de potencia monofásicos, así como el ángulo de la carga capacitiva conectada para el cual se empieza a producir efecto Ferranti, es esencial comprender bien el funcionamiento de los transformadores de este tipo y bajo qué condiciones se produce dicho efecto.

En este apartado se estudiará al detalle los transformadores monofásicos en carga, el efecto de conectarles distintos tipos de carga, la caída de tensión, el método gráfico de Kapp y el método analítico de Arnold para calcular la caída de tensión, el efecto Ferranti y el ángulo de Ferranti obtenido a partir del método de Kapp.

5.1. Transformador de potencia monofásico

Un transformador de potencia monofásico está formado por un circuito magnético, lo que se denomina el núcleo del transformador, y dos circuitos magnéticos arrollados a dicho núcleo. De estos dos arrollamientos denominados devanados el primario sería por el que se le inyecta la energía al transformador y el secundario por el que se devuelve la energía transformada a la red. Se diferencian dos tipos de transformadores de potencia monofásicos por un lado el transformador elevador, aquel que recibe baja tensión (BT) por su devanado primario y devuelve a la red alta tensión (AT) por su devanado secundario. Por otro lado, el transformador es reductor si recibe AT por su devanado primario y entrega BT por su devanado secundario.

Los elementos fundamentales que constituyen un transformador son los siguientes:

- Las partes activas: Devanado primario (N_1), devanado secundario (N_2) y núcleo magnético. Son los responsables de la recepción, conversión y transmisión de la energía eléctrica.

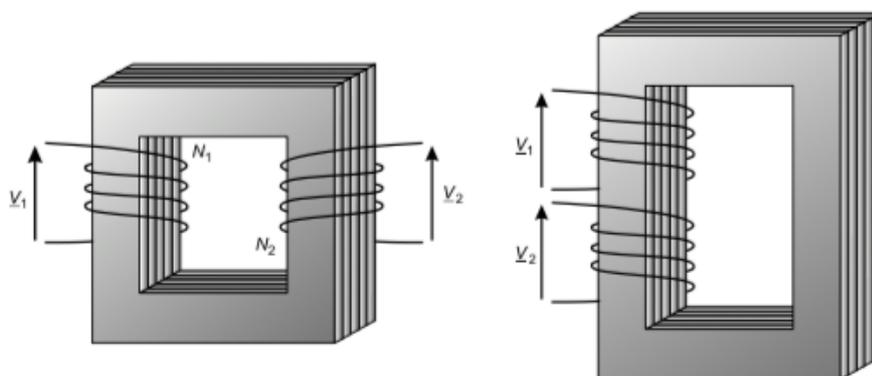


Figura 3. Partes activas de un transformador de potencia (1).

- Sistema de entrada y salida: Los elementos que permiten conectar tanto el devanado primario como el secundario a la red. Dependiendo de si se conecta AT o BT tienen unas protecciones u otras. Para AT aislantes más altos y conductores de menor sección y para BT aislantes más bajos y conductores de mayor sección (1).
- Sistemas de refrigeración: Son los sistemas instalados en el transformador para evacuar las pérdidas originadas transformadas en calor.
- Sistemas de protección: Diferentes tipos de protecciones eléctricas o no eléctricas para proteger las distintas partes que componen el transformador.
- Sistemas de control: Son los diferentes sensores y actuadores instalados en el transformador para controlar que todos los parámetros están dentro de los rangos de funcionamiento. También utilizadas para conectar y desconectar la máquina de la red.

5.1.1. Principio de funcionamiento

Cuando se hace circular una corriente alterna por el devanado primario, en éste se genera un flujo alterno que circula por el núcleo magnético que dependerá del voltaje aplicado, la frecuencia de dicho voltaje y el número de espiras. El flujo mutuo se vinculará con el devanado secundario e inducirá un voltaje que dependerá del número de espiras arrolladas en el secundario y de la magnitud del flujo mutuo (4). Por lo tanto, la notación que gobierna el funcionamiento de los transformadores es:

$$E = 4.44 \cdot N \cdot \Phi \cdot f$$

Siendo:

E = tensión tanto del primario como del secundario (E_1 o E_2).

N = número de espiras en cada uno de los devanados (N_1 o N_2).

Φ = flujo que recorre el núcleo magnético.

f = frecuencia de la tensión aplicada en el devanado primario.

Esta notación diferirá dependiendo de las pérdidas internas del transformador y de función de si la máquina está conectada a una carga o no. Se podrán hacer simplificaciones pertinentes que se discutirán más adelante. También hay que tener en cuenta que la mayoría del flujo se transmitirá por el núcleo magnético pero que tanto en el devanado primario como en el secundario se produce un flujo adicional, el flujo de dispersión, que atraviesa un devanado sin pasar al siguiente. Este flujo es muy pequeño

en comparación con el flujo mutuo que si se trasmite de un devanado a otro, pero aun así desempeña un papel fundamental en el funcionamiento de la máquina.

Como se dice en (4) consiguiendo el número de espiras adecuado en el devanado primario y secundario, es posible obtener cualquier conversión de voltajes e intensidades.

5.2. Transformador de potencia monofásico real en carga

Un transformador de potencia monofásico está en carga cuando alimentado por su devanado primario tiene una carga conectada en su devanado secundario. Que sea real significa que no se desprecia ningún efecto, por lo tanto, se tienen en cuenta el efecto de histéresis y saturación en el núcleo, siendo la conductividad del mismo distinta de cero apareciendo pérdidas magnéticas. También se tiene en cuenta la resistencia de los devanados que producen pérdidas (5).

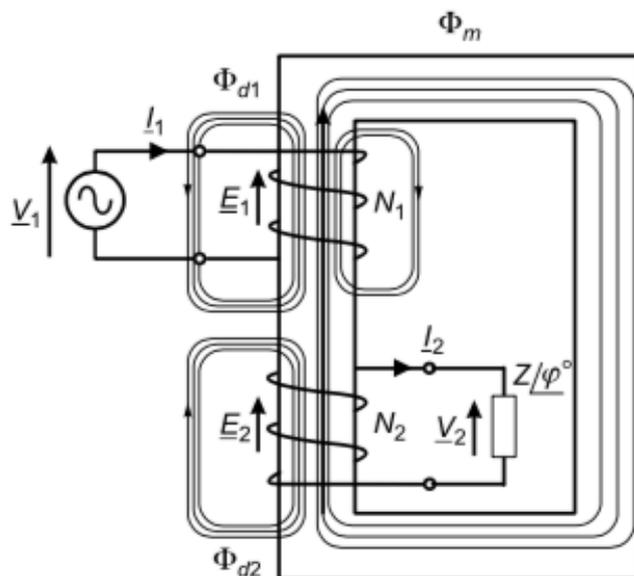


Figura 4. Transformador real en carga (1).

En la figura 4 se puede observar la representación de un transformador real en carga. Debido a que no se desprecian las resistencias internas de cada devanado la tensión aplicada al primario (V_1) diferirá de la tensión inducida en las espiras (E_1) que es el causante del flujo mutuo (φ_m) como del flujo de dispersión en el devanado primario (φ_{d1}). φ_m induce a su vez una tensión (E_2) en las espiras del secundario que debido a las pérdidas generadas por la resistencia de dicho devanado la tensión que finalmente

soportará la carga será distinta, siendo esta V_2 . ϕ_{d2} es el flujo de dispersión que se induce en el devanado secundario producido por E_2 .

En la realidad la diferencia entre V_1 y E_1 es muy pequeña, así como la diferencia entre V_2 y E_2 por lo tanto se cumple lo siguiente:

$$V_1 \approx E_1 = 4.44 \cdot N_1 \cdot \phi_0 \cdot f$$

$$V_2 \approx E_2 = 4.44 \cdot N_2 \cdot \phi_0 \cdot f$$

Por lo tanto, se observa que en carga no se cumple la relación de transformación. Si el transformador fuese ideal (circuito magnético no saturado, no hay pérdidas en el hierro, los bobinados de resistencia y no hay flujo de dispersión) y estuviese en vacío se cumpliría que la división de entre E_1 y E_2 sería exactamente igual a V_1 entre V_2 que a su vez esta división sería a (la relación de transformación). En el caso de estudio, el transformador real en carga, esta relación no se cumple y aparecería lo que se denomina la *caída de tensión* que se estudiara más adelante.

$$\frac{V_1}{V_2} \approx \frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2} = a$$

5.3. Circuito equivalente del transformador

Con el fin de obtener un circuito equivalente válido del transformador de potencia monofásico hay que tener en cuenta las siguientes consideraciones mencionadas en la referencia (6):

- Perdidas en el cobre: Son las pérdidas por calentamiento resistivo de los bobinados primario y secundario. Para representar estas pérdidas en el circuito equivalente se representará cada devanado con una resistencia. R_1 para el devanado primario y R_2 para el devanado secundario.
- Perdidas por corrientes parásitas y pérdidas por histéresis: Denominadas pérdidas en el hierro. Por un lado, las pérdidas por corrientes parásitas son las debidas al calentamiento resistivo en el núcleo magnético del transformador, proporcionales al cuadrado del voltaje aplicado al transformador. Las pérdidas por histéresis son las relacionadas con el reordenamiento de los dominios magnéticos. Ambas pérdidas que pueden representarse en una rama recorrida por una intensidad I_{Fe} que recorre una conductancia G_0 .

- Flujo disperso: Los flujos φ_{d1} y φ_{d2} que escapan del núcleo y que atraviesan solo los devanados correspondientes son flujos dispersos. Esta fuga de flujos produce una autoinductancia en las bobinas primaria y secundaria, y sus efectos deben tenerse en cuenta. Para representar los flujos de fugas en el circuito equivalente del transformador se hará con dos bobinas ideales, X_1 para el bobinado primario y X_2 para el bobinado secundario.

Para conseguir el circuito equivalente del transformador de potencia monofásico adecuado habría que representar los efectos del flujo mutuo. φ_m crea una corriente de magnetización I_m que atrasa el voltaje aplicado en 90° , por lo tanto, puede modelarse con una susceptancia B_0 conectada en paralelo con la fuente de voltaje primario (6), esto es conectad en paralelo a la rama por la que circula I_{Fe} .

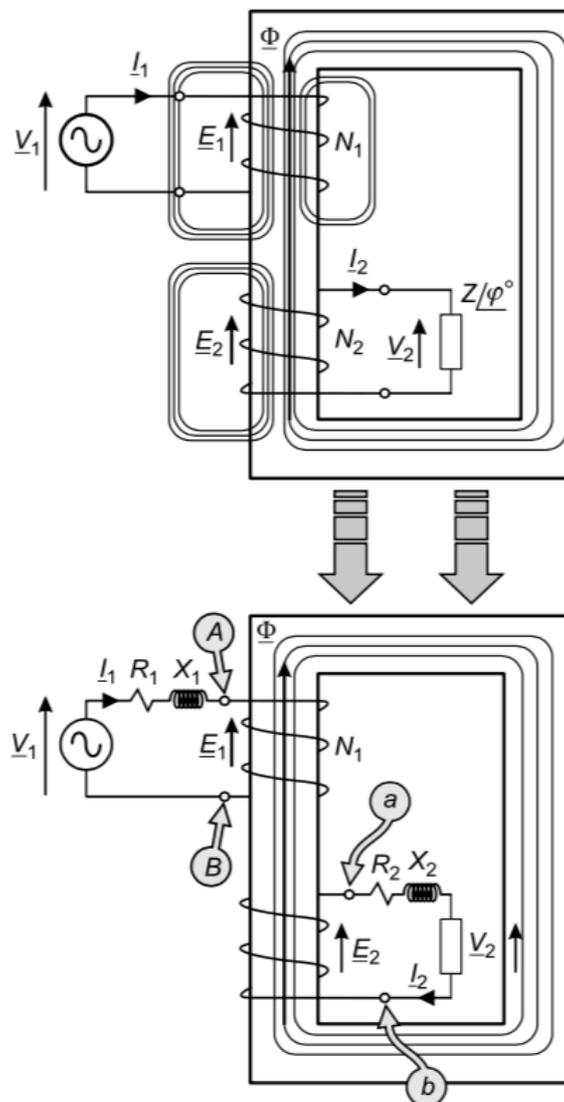


Figura 5. Representación del transformador real en carga (1).

En la figura 5 solo se puede apreciar las resistencias e inductancias que equivalen al devanado primario y secundario. Por lo tanto, para poder representar toda las corrientes e impedancias hace falta conectar el punto *a* con *A* y el punto *b* con *B*. Para poder conectar sendos puntos es necesario que exista una equivalencia eléctrica, para conseguirla se refieren los valores del secundario al primario utilizando la relación de transformación consiguiendo que $E_1 = E'_2$. Una vez referido el secundario a valores del primario el circuito equivalente del transformador de potencia monofásico real conectado a una carga sería el siguiente:

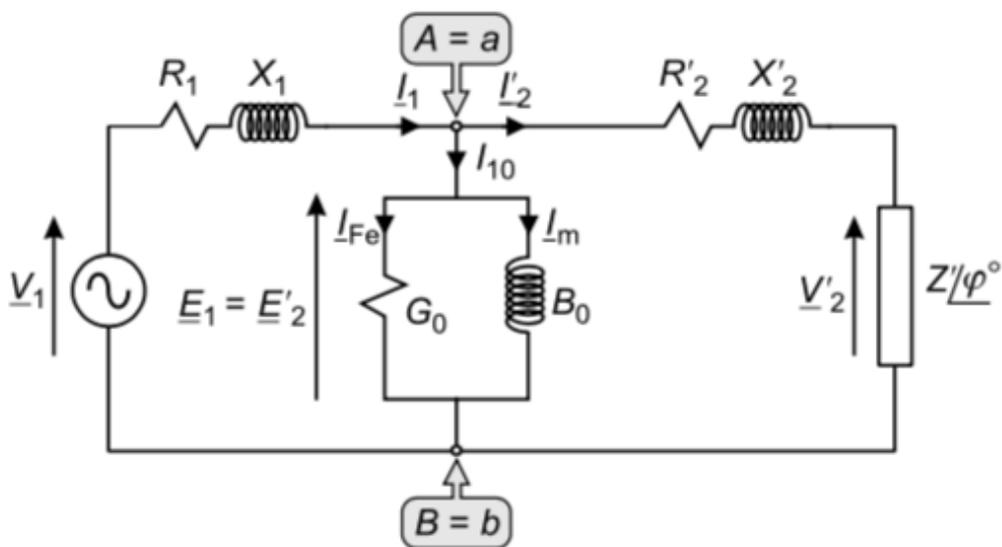


Figura 6. Circuito equivalente de transformador monofásico conectado a carga (1).

Para completar el apartado se presentará el diagrama vectorial de este tipo de transformadores conectados a carga para observar cómo debido a las distintas pérdidas se produce una caída de tensión tanto en el primario como el secundario.

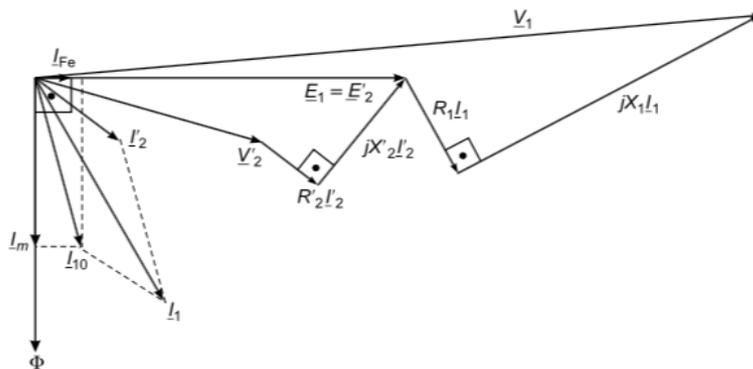


Figura 7. Diagrama vectorial del transformador real en carga (1).

En dicho diagrama (figura 7) el triángulo formado por R_1 y X_1 tanto el formado por R_2 y X_2 están exagerados para comprender mejor el funcionamiento. Pero se puede apreciar perfectamente como el valor E_1 y V_1 y el valor de V'_2 y E'_2 no cumplen la relación de transformación como se había mencionado en el apartado anterior.

5.4. Circuito equivalente simplificado del transformador

El circuito equivalente mostrado en la figura 7 representa el transformador con más detalles del requerido para la mayoría de problemas. En este apartado se van a tener en cuenta las relaciones existentes entre los distintos parámetros anteriormente mencionados para lograr una simplificación mayor del circuito equivalente del transformador monofásico.

Por un lado, cuando el transformador no está conectado a ninguna carga I_2 es nulo, como consecuencia $I_0 = I_{Fe} + I_m$ es la única intensidad que recorre la resistencia e inductancia del primario (7). Estas impedancias son tan pequeñas que se puede considerar que la caída de tensión que producen es prácticamente nula, por lo tanto, se supone que $V_1 \approx E_1$. Por otro lado, se observa que la corriente I_1 es por lo menos veinte veces más mayor que la corriente $I_0 = I_{Fe} + I_m$. Por lo tanto, despreciando la intensidad de vacío frente a la intensidad del primario se puede considerar que $I_1 \approx I'_2$ (7). Hechas las simplificaciones el circuito equivalente sería:

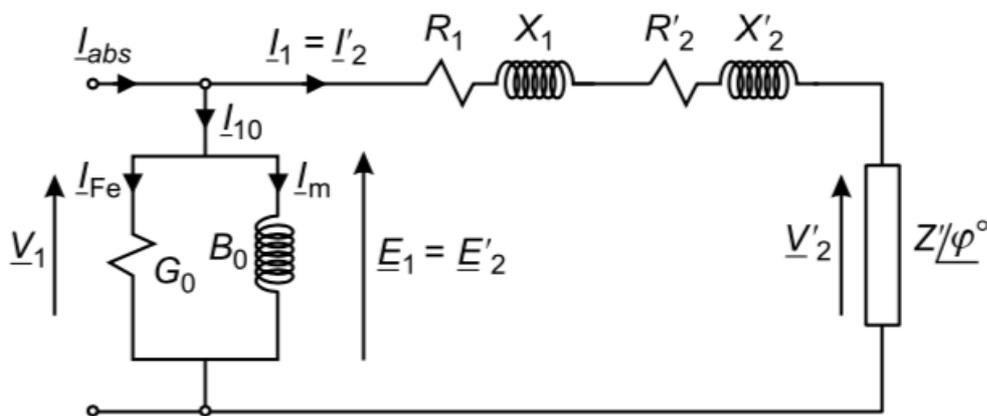


Figura 8. Circuito equivalente simplificado (1).

Para lograr un circuito aún más simplificado se obtendrán las resistencias e inductancias equivalentes:

$$R_e = R_1 + R'_2$$

$$X_e = X_1 + X'_2$$

I_{abs} es la corriente con la que se alimenta la máquina.

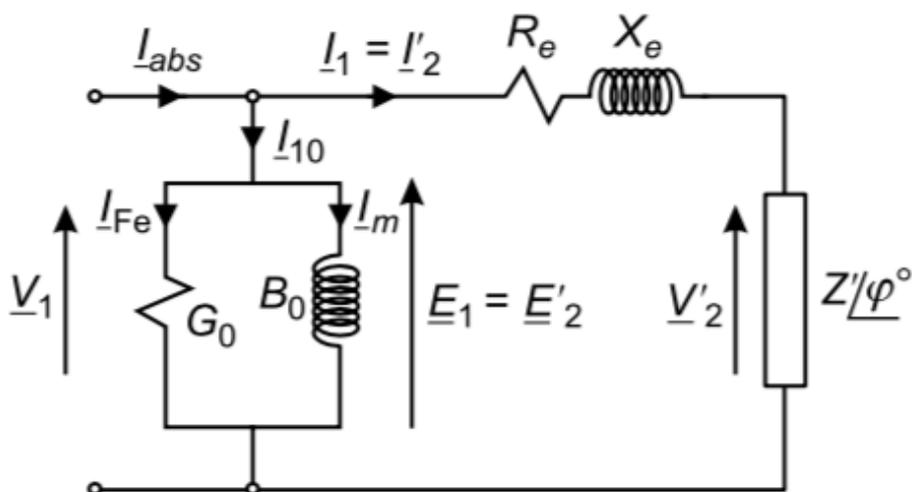


Figura 9. Circuito equivalente simplificado práctico del transformador (1).

A continuación, partiendo del circuito simplificado práctico se van a representar los diagramas vectoriales del transformador para cargas tanto capacitivas como inductivas.

5.4.1. Transformador conectado a carga inductiva

Conectando una carga inductiva al transformador se observa que siempre se cumple que $V_1 > V'_2$ como se demuestra en el diagrama vectorial del circuito simplificado práctico:

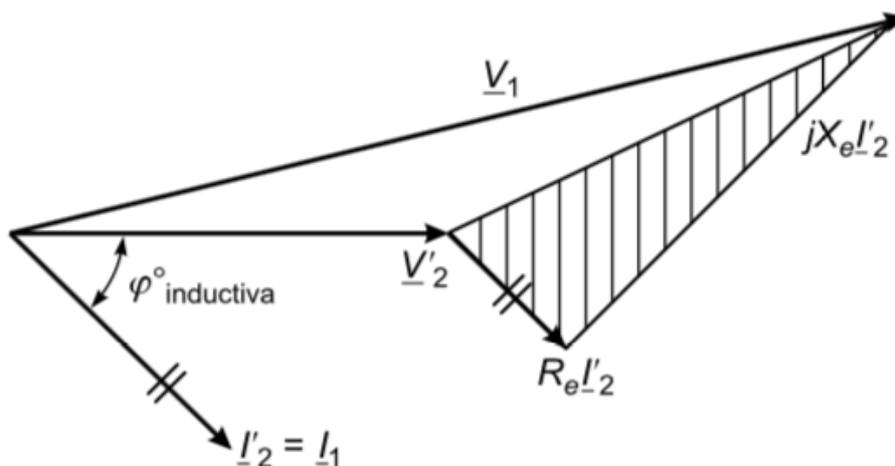


Figura 10. Diagrama vectorial simplificado (Carga inductiva) (1).

5.4.2. Transformador conectado a carga capacitiva

En el caso de que la carga conectada sea de tipo capacitivo pueden llegar a producirse casos donde $V_1 < V'_2$, este fenómeno es conocido como efecto Ferranti y se estudiara con detalle más adelante en esta sección. El diagrama vectorial simplificado de un transformador con una carga capacitiva conectada es el siguiente:

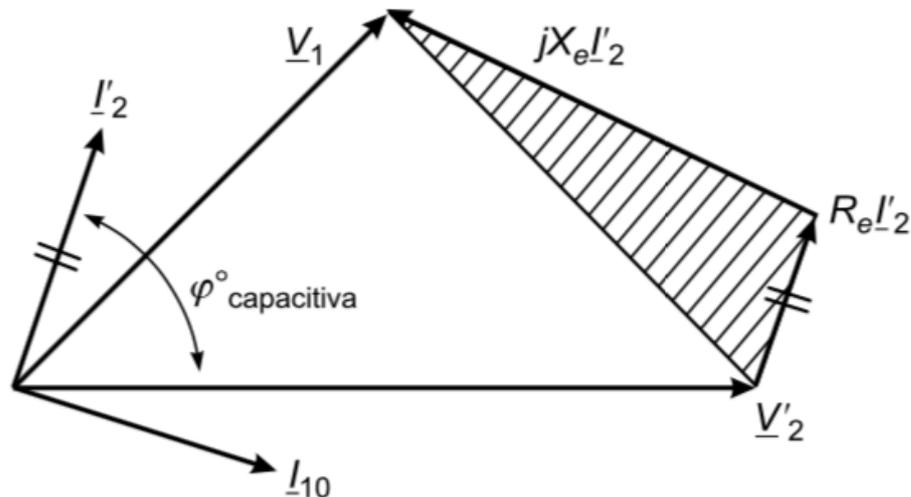


Figura 11. Diagrama vectorial simplificado (carga capacitiva): efecto Ferranti (1).

5.5. Caída de tensión. Coeficiente de variación de tensión

Si alimentamos un transformador a su tensión nominal V_{1N} en vacío proporcionara la tensión secundaria nominal V_{2N} . Pero si este transformador estuviera conectado a una carga el valor de la tensión diferirá de V_{2N} un porcentaje denominado coeficiente de variación de tensión (u). En otras palabras, el interés se centra en conocer el valor eficaz de la tensión real en el secundario en carga respecto del que existirá en condiciones nominales (8). El valor de la tensión será mayor o menor en función de la carga conectada. Si la carga es inductiva la tensión de la salida en el secundario será siempre menor que la tensión ideal en vacío, si la carga es resistiva pura la tensión también será menor que la tensión ideal en vacío, pero algo mayor que en el caso de carga inductiva y, por último, si la carga es capacitiva puede que se den casos de que la tensión de salida sea mayor que la tensión nominal en vacío produciéndose efecto Ferranti.

Como se ha mencionado antes, para darle valor a la caída de tensión que se produce en el transformador al conectar una carga se usa el coeficiente de variación de tensión (u), que se puede definir de la siguiente manera:

$$u = \frac{V_{1N} - V'_2}{V_{1N}} \cdot 100$$

Conociendo este coeficiente se puede calcular la tensión real a la salida del transformador de potencia monofásico:

$$V'_2 = V_{1N} \cdot \left(1 - \frac{u}{100}\right) \Rightarrow V_2 = V_{2N} \cdot \left(1 - \frac{u}{100}\right)$$

Para entender la caída de tensión de una forma gráfica se va a presentar el diagrama vectorial simplificado práctico de un transformador conectado a una carga inductiva:

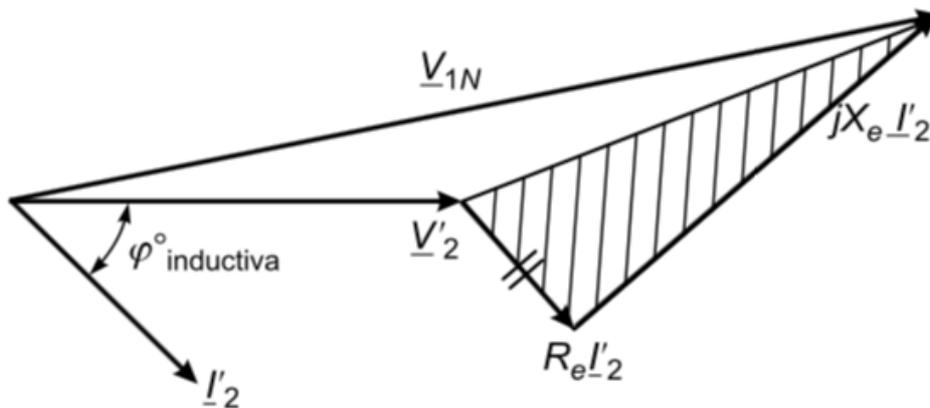


Figura 12. Caída de tensión ante carga inductiva (1).

Como se puede observar, al alimentar el transformador a su tensión nominal V_{1N} la tensión de salida V'_2 es menor. El triángulo formado por la resistencia equivalente R_e y la inductancia equivalente X_e respectivamente sería lo que representa la caída de tensión.

Para calcular el coeficiente de variación de tensión se pueden utilizar dos métodos, por un lado, el método gráfico de Kapp y por otro lado el método analítico de Arnold. Se exponen en los siguientes dos apartados.

5.5.1. Método gráfico de Kapp

Método gráfico que se apoya en el diagrama vectorial equivalente práctico del transformador y en su expresión:

$$\underline{V}_{1N} = \underline{V}'_2 + \underline{I}'_2 \cdot (R_e + jX_e)$$

Como se explica en (1), dibujando a una cierta escala las tensiones el triángulo construido por los catetos $(R_e \cdot I'_2)$ y $(X_e \cdot I'_2)$. A los vértices del mismo se le denomina O y

O'. Por dicho punto O' se traza una horizontal y por este mismo punto se traza una recta que forma con la horizontal un ángulo φ_{ind} (con sentido anti horario) o φ_{cap} (con sentido horario). Desde el punto O y con radio V_{1N} se traza un arco de circunferencia que cortará a la anterior recta (inductiva o capacitiva) en cierto punto A. Se tiene por tanto que la distancia entre O' y A es V'_2 . Por último, se traza una circunferencia con centro en O' y radio V_{1N} ésta cortara a su vez a la recta (inductiva o capacitiva) en un punto B, por lo tanto, se cumple que la distancia entre O' y B es V_{1N} . El gráfico resultante es el siguiente:

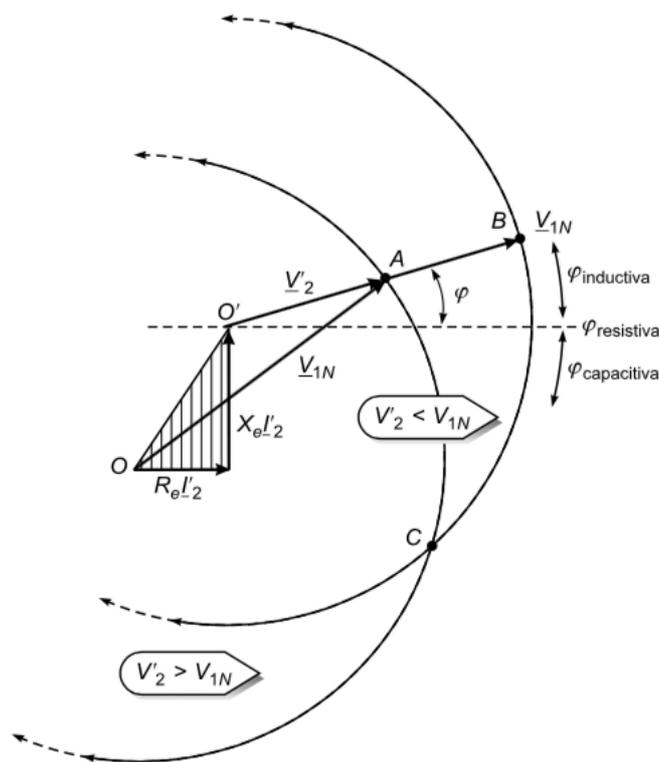


Figura 13. Método de Kapp (1).

De la figura 13 se puede obtener el coeficiente de variación de tensión (u) dividiendo la distancia entre A y B entre la distancia entre O' y B y multiplicando por 100.

$$u = \frac{\overline{AB}}{\overline{O'B}} \cdot 100$$

De este método se obtendrá la formulación necesaria para cuantificar el ángulo capacitivo que produce el efecto Ferranti.

5.5.2. Método analítico de Arnold

Para obtener el coeficiente de variación de tensión por el método de Arnold previamente hay que conocer los coeficientes de Arnold:

- Tensión de cortocircuito resistiva: $u_R = \frac{R_e \cdot I_{1N}}{V_{1N}} \cdot 100$
- Tensión de cortocircuito reactiva: $u_X = \frac{X_e \cdot I_{1N}}{V_{1N}} \cdot 100$
- Tensión de cortocircuito: $u_Z = \sqrt{u_R^2 + u_X^2}$

Y definiendo el índice de carga (i) como el cociente entre intensidad que recorre la línea y la intensidad nominal:

$$i = \frac{I_1}{I_{1N}} = \frac{I_2}{I_{2N}} = \frac{I'_2}{I_{1N}} = \frac{S}{S_N}$$

Finalmente se obtiene la expresión de Arnold que permite obtener el coeficiente de variación de tensión en función de los parámetros mencionados anteriormente:

$$u = i \cdot (u_R \cdot \cos\varphi + u_X \cdot \sin\varphi) + \frac{i^2}{200} \cdot (u_X \cdot \cos\varphi - u_R \cdot \sin\varphi)^2$$

Como observación cabe indicar que la formulación obtenida es tanto para cargas inductivas como resistivas puras. Si se desea obtener el coeficiente de variación de tensión para cargas capacitivas se deben cambiar la suma por una resta del primer sumando y la resta por una suma del segundo sumando.

$$u = i \cdot (u_R \cdot \cos\varphi - u_X \cdot \sin\varphi) + \frac{i^2}{200} \cdot (u_X \cdot \cos\varphi + u_R \cdot \sin\varphi)^2$$

5.6. Efecto Ferranti

Como se ha ido mencionando a lo largo de este apartado el efecto Ferranti se produce cuando la tensión secundaria del transformador puede llegar a ser mayor que en vacío debido al carácter capacitivo de la carga conectada. También se podría decir que la caída de tensión es negativa (9). Esto constituye el **efecto Ferranti**.

Gráficamente se observa con claridad en el diagrama vectorial simplificado práctico de un transformador conectado a una carga capacitiva como el de la figura 11 donde $V'_2 > V_1$, produciéndose así el efecto Ferranti.

En la figura 13 (método de Kapp) el efecto Ferranti se empieza a producir a partir del punto C. Para ángulos capacitivos por encima del punto C se sigue cumpliendo que $V'_2 < V_1$ no produciéndose así efecto Ferranti. En el punto C se cumple $V'_2 = V_1$ y aquí es donde está el ángulo capacitivo límite para el cual no se produce efecto Ferranti al

que se denomina ángulo de Ferranti (φ_{Ferr}). Por debajo del punto C, para ángulos capacitivos mayores que φ_{Ferr} , se cumple que $V_2 > V_1$ produciéndose el efecto Ferranti.

5.6.1. Cálculo del ángulo capacitivo de Ferranti

En este apartado se expondrá una demostración para la obtención del ángulo de Ferranti a partir del método de Kapp (figura 13).

En primer lugar, calculamos la distancia entre O y O':

$$\overline{OO'} = \sqrt{(R_e \cdot I'_2)^2 + (X_e \cdot I'_2)^2} = I'_2 \cdot \sqrt{R_e^2 + X_e^2} = I'_2 \cdot Z_e$$

A continuación, se calcula el ángulo entre $(X_e \cdot I'_2)$ y OO' ($Z_e \cdot I'_2$):

$$\alpha = \arctg\left(\frac{R_e \cdot I'_2}{X_e \cdot I'_2}\right) = \arctg\left(\frac{R_e}{X_e}\right)$$

Por otro lado, se sabe que el triángulo que forman los puntos O, O' y C es isósceles con dos lados iguales de valor V_1 y el lado desigual de valor $Z_e \cdot I'_2$. Por lo tanto, el ángulo que forman V_1 y $Z_e \cdot I'_2$ será:

$$\beta = \arccos\left(\frac{I'_2 \cdot Z_e}{2 \cdot V_1}\right)$$

Así se demuestra que el ángulo de Ferranti tiene la siguiente expresión:

$$\varphi_{Ferranti} = 90^\circ - (\beta - \alpha)$$

Como para que el ángulo de la carga debe ser capacitivo para que se produzca el efecto Ferranti, $\varphi_{Ferranti}$ debe ser sí o sí un ángulo capacitivo.

6. ANÁLISIS DE ALTERNATIVAS

6.1. Técnicas de carácter correctivo, preventivo y predictivo

En este apartado se discutirán diferentes técnicas de actuación para evitar que aparezca el efecto Ferranti. Las diferentes medidas que se pueden utilizar se pueden englobar en tres clases: técnicas correctivas, preventivas y predictivas.

6.1.1. Técnicas de carácter correctivo

Las técnicas que se agrupan en el grupo de carácter correctivo se denominan así por llevarse a cabo una vez se haya producido la avería. Lo habitual es dejar que el defecto se produzca, posteriormente analizarlo para determinar su alcance e impacto sobre la máquina, sus elementos y la instalación. Una vez analizado el efecto de la avería, determinar los elementos dañados y proceder con el protocolo de actuación que corresponda para resolver el daño producido.

En el caso de que se produzca efecto Ferranti en un transformador y se desea utilizar una técnica de carácter correctivo para solucionar el problema primero se debe detectar el efecto, luego habría que determinar cuáles son los elementos dañados y el alcance del daño en la instalación por haber estado sometidos a tensiones e intensidades superiores a las nominales y por último seguir el protocolo de reparación o recambio de los elementos dañados.

6.1.2. Técnicas de carácter preventivo

Con las técnicas de carácter preventivo se pretende evitar que se llegue a producir el fallo, o tratar de posponerla en el tiempo en la medida de lo posible. La mayor desventaja de esta técnica es que no se optimizan al máximo los tiempos de vida de los elementos de la máquina y de la instalación ya que se cambian antes de tiempo para evitar la avería. Por otro lado, las técnicas de actuación preventivas lo único que consiguen es retrasar dichas averías parcialmente, puesto que tarde o temprano se llegan a producir y si el diseño de las protecciones no es el adecuado para soportar estos fallos o los protocolos de actuación ante estas situaciones no está bien planeado, el coste final puede ser considerablemente superior a la inversión inicial realizada para la construcción de la instalación.

En el caso de los transformadores de potencia que sufren el efecto Ferranti no tendría mucho sentido hablar de técnicas de carácter preventivo ya que no depende de la máquina que se produzca el efecto, sino de ángulo de la carga capacitiva conectada. Lo interesante sería aplicar estas técnicas de carácter preventivo a la línea para evitar ángulos capacitivos que provoquen el efecto Ferranti en el transformador.

6.1.3. Técnicas de carácter predictivo

En relación a las técnicas de carácter predictivo, como su nombre indica, tienen objetivo de predecir cuándo pueden llegar a aparecer los fallos o averías en el sistema y determinar los efectos y consecuencias debidas a dichos fallos o averías. Por lo general se intenta mediante distintos mecanismos (simulaciones software, pruebas de campo, ...) reproducir las situaciones que provocarían los efectos adversos en el sistema de estudio, para intentar detectar y posteriormente estudiar las consecuencias que provoca el fallo e incluso intentar predecir de forma aproximada cuando se daría dicho fallo. Después de haber detectado los puntos de riesgo para el sistema, se proporcionan medios para anteponerse a la aparición de los efectos que puedan producir la avería. Los medios de prevención son protocolos de actuación que incluyen revisiones y actuaciones periódicas, así como recambios de los elementos más sensibles al fallo, pero con un aprovechamiento de su vida útil más ajustado (eliminando así la desventaja que tienen las técnicas de carácter preventivo).

Este Trabajo Fin de Grado proporciona una solución que se podría englobar en las técnicas de carácter predictivo, ya que es una simulación software de un transformador de potencia monofásico en el que introduciendo los datos característicos del transformador y unas condiciones de carga determinadas indica si se produce efecto Ferranti o no. Su utilidad radica en que se puede utilizar en el proceso de diseño del transformador. Sabiendo que la condición de carga va a ser capacitiva, se pueden ir variando los parámetros característicos del transformador (resistencias e inductancias internas) para evitar que se produzca el efecto Ferranti. Por lo tanto, la interfaz desarrollada tiene un carácter predictivo, predice cuales son las características del transformador que ayudan a que se produzca el efecto adverso (el efecto Ferranti) y con esa información se puede intervenir en el propio proceso de diseño de la máquina evitando episodios futuros de desgaste de los aislamientos de la máquina ante tensiones e intensidades mayores que las nominales.

6.2. Análisis de alternativas para el estudio del efecto Ferranti

Como ya se ha mencionado en el apartado tres, el objetivo fundamental de este TFG es el desarrollo de una interfaz gráfica que, ante unas condiciones determinadas de carga, nos permita saber si se produce efecto Ferranti en un transformador de potencia monofásico. Por lo tanto, en este apartado se van a presentar las razones por las que es más ventajoso disponer de una herramienta de simulación software para el estudio del efecto Ferranti frente a las pruebas de campo y los modelos físicos a escala.

6.2.1. Pruebas de campo

Consiste hacer las medidas directamente en el transformador. Se trata de provocar el efecto Ferranti consiguiendo ángulos capacitivos que hagan que la tensión del secundario del transformador a estudiar se eleve por encima de la tensión eficaz. Se toman las medidas necesarias para el cálculo del ángulo capacitivo y las tensiones e intensidades que aparecen al producirse el efecto. De todos los procesos que se presentan es el que más se ajusta a la realidad, pero también conlleva riesgo de provocar fallos indeseados en el transformador si se realizan mal las pruebas.

6.2.2. Modelos físicos a escala

Esta alternativa trata de reproducir el transformador a estudiar a escala, reproduciendo las condiciones de funcionamiento que tendría en la realidad. Sobre el prototipo se realizan las pruebas pertinentes para el análisis del efecto Ferranti. Este proceso se lleva a cabo en un entorno que no es real, pero aplicando las correctas relaciones de semejanza eléctrica podría conducir a resultados bastante fiables. El inconveniente de esta alternativa es la inversión necesaria para construir el modelo a escala.

6.2.3. Simulación software

Consiste en diseñar un modelo del transformador mediante una herramienta software programando los distintos aspectos teóricos y de comportamiento de la máquina. Una vez terminado el simulador se introducen los datos característicos del transformador y las condiciones de carga a las que se va a trabajar y el programa nos informará de cuál es el ángulo de la carga capacitiva para el cual se produce efecto Ferranti. De todas las opciones presentadas es la única que no realiza pruebas en un entorno real. La ventaja que presenta es que es la que menos inversión necesita y los resultados obtenidos no se alejan demasiado de la realidad.

6.2.4. Criterios de selección

A continuación, se plantean los criterios de selección utilizados para la comparación de las alternativas explicadas en el apartado anterior:

- Costes económicos: La alternativa seleccionada para realizar los diferentes estudios necesarios tiene que ser lo más económica posible. Esto evitaría añadir gastos a la hora de analizar el efecto en los transformadores.
- Recursos humanos y materiales necesarios: Tanto el personal utilizado como el uso de material debe de ser imprescindible para el correcto estudio del efecto Ferranti.

- Cantidad de resultados: La elección as correcta será aquella que permita obtener la mayor cantidad de resultados en el menor tiempo posible. De este modo, cuantos mayores resultados se obtengan y mayor sea la cantidad datos disponibles, mayor será la precisión con la que se podrá entender y caracterizar el funcionamiento de los transformadores ante cargas con ángulo capacitivo.
- Fiabilidad y precisión de los resultados: Que los resultados obtenidos mediante los distintos métodos sean fiables, de calidad y que se ajusten con una precisión considerable a la realidad es uno de los aspectos importantes a tener en cuenta a la hora de seleccionar el método adecuado para el análisis de cualquier falta o fallo en los transformadores.

6.2.5. Conclusión del análisis

Como se ha explicado al inicio del análisis de alternativas para el estudio del efecto Ferranti, este apartado tiene como objetivo demostrar por qué la simulación software es más adecuada para el estudio del efecto Ferranti. Lo mejor para demostrar que dicha técnica es la más adecuada es hacer una comparación entre las distintas alternativas frente a los criterios fundamentales a tener en cuenta.

A continuación, se presenta una tabla para hacer la comparación de las distintas alternativas para el análisis del efecto Ferranti. Dando un peso concreto a cada criterio de selección y otorgando una puntuación a cada alternativa en función del grado de cumplimiento de los distintos criterios. La puntuación utilizada para la evaluación es el siguiente:

- 0 = malo.
- 5 = medio.
- 10 = bueno.

	PESO	VALORACIONES SOBRE 10		
		Pruebas de campo	Modelos físicos a escala	Simulación software
Coste económico	45 %	0	5	10
Recursos humanos / materiales	10 %	0	5	10
Cantidad de resultados	20 %	5	5	10
Fiabilidad y precisión	25 %	10	5	5
TOTAL (sobre 10)		3,5	5	8,75

Tabla 1. Valoración del análisis de alternativas

Con estos resultados queda demostrado que la opción de simulación software es la más adecuada para el análisis del efecto Ferranti en transformadores. Precisamente, el objetivo de este Trabajo Fin de Grado es desarrollar una interfaz gráfica que permita determinar la aparición del efecto Ferranti en transformadores monofásico, introduciendo los datos característicos de la máquina y las condiciones de carga a las que trabaja.

En la tabla 1, se observa claramente que la opción de hacer el análisis del efecto mediante una simulación software es la más económica, la que menos recursos humanos y materiales necesita y la que más cantidad de datos aporta frente a las otras dos alternativas. Teniendo un peso del 40% los costes económicos, un 10% los recursos humanos y materiales, un 20% la cantidad de resultados y un 25% la fiabilidad de los mismos; la simulación software obtiene un 10 en los tres primeros y un 5 en la fiabilidad de los resultados debido a que no son tan precisos como los resultados obtenidos en las pruebas de campo.

Las puntuaciones finales quedan de la siguiente manera para las distintas alternativas presentadas:

- Un 3,5 para las pruebas de campo, siendo la menos recomendada.
- Un 5 para los métodos físicos a escala.
- Un 8,75 para la simulación software, siendo la más recomendada.

6.3. Elección de la herramienta software

Una vez demostrado que la simulación software es la opción más adecuada para el análisis del efecto Ferranti en transformadores de potencia, en este apartado se presentan diferentes softwares que permitirían desarrollar dicha simulación. Haciendo un análisis de cada una de las aplicaciones presentadas en la conclusión del análisis se determina cual es el software más adecuado para el desarrollo de la interfaz gráfica propuesta en este proyecto.

6.3.1 Mathcad

Mathcad es una herramienta informática que lleva incorporadas todas las funcionalidades de las hojas de cálculo, una gran potencia debido a su extensa librería de funciones y una alta compatibilidad con muchas de las herramientas más utilizadas en la ingeniería (10).

6.3.2. MATLAB (Matrix Laboratory) – GUIDE (Graphical User Interface Development Environment)

MATLAB es un programa interactivo que combina el cálculo numérico con representaciones gráficas. De esta forma integra el análisis numérico, el cálculo matricial y el procesamiento de señales con gráficos que facilitan la comprensión de dichos cálculos (10). GUIDE es una herramienta que se incluye en MATLAB que permite diseñar interfaces gráficas de usuario añadiendo figuras, cajas de texto, botones, distintos tipos de menús, etc.

6.3.4. ATP (Alternative Transients Program)

Esta herramienta software permite la realización de cálculos electromagnéticos con fines de diseño, especificaciones de equipos y definición de parámetros eléctricos. El programa permite modelizar sistemas eléctricos a través de resistencias, inductancias y capacidades (con parámetros concentrados y distribuidos), representando también interruptores y fuentes. Cada uno de estos elementos pueden variar su valor en función de las necesidades del sistema (10).

6.3.5. PSCAD/EMTDC

Básicamente todas las funciones y técnicas de simulación utilizadas en PSCAD/EMTDC son muy similares a las utilizadas en ATP. Está dividido en dos módulos, el primero EMTDC simulador de sistemas eléctricos y el segundo PSCAD para realización de interfaz gráfica de usuario. EL programa en sus orígenes fue desarrollado para estudiar fenómenos electromagnéticos en corriente continua, hoy en día se puede utilizar para una alta gama de estudios de simulación (10).

6.3.6. Criterios de selección

Criterios a tener en cuenta para la correcta selección de la herramienta para diseñar la interfaz gráfica:

- Flexibilidad: La herramienta elegida deberá de ser flexible ante cambios puntuales en el diseño de la interfaz gráfica sin que suponga el cambio una alteración completa de la aplicación realizada.
- Tiempos de simulación: Tener en cuenta la ventaja de que el tiempo de simulación necesario sea bajo a la hora de realizar los cálculos pertinentes para determinar si se produce efecto Ferranti.
- Posibilidad de implementar una interfaz: Que la herramienta seleccionada tenga la posibilidad de implementar una interfaz gráfica será un requisito indispensable. Uno de los criterios más importantes a la hora de realizar la selección ya que el proyecto se basa en desarrollar una interfaz gráfica.
- Simplicidad de la herramienta: El entorno de diseño de la interfaz deberá ser fácil e intuitivo.
- Coste económico: Se valorará positivamente si la licencia de la herramienta a seleccionar es de un bajo coste.

6.3.7. Conclusión del análisis

Para hacer la selección correcta se asocian unos porcentajes de peso con los criterios mencionados y luego se califica a cada una de las opciones con una nota en función del grado de cumplimiento del requisito. Siendo el criterio de evaluación:

0 = malo

5 = medio

10 = bueno

	PESO	VALORACIÓN SOBRE 10			
		Mathcad	MATLAB (Guide)	ATP	PSCAD/EMTDC
Flexibilidad	20 %	10	10	10	10
Tiempos de simulación	15 %	5	5	0	5
Posibilidad interfaz	30 %	0	10	0	5
Simplicidad de la herramienta	15 %	5	10	0	5
Coste económico	20 %	5	5	10	5
TOTAL (Sobre 10)		4,5	8,25	4	6

Tabla 2. Valoración de las distintas herramientas para el desarrollo del simulador software.

En la tabla se obtiene que para una puntuación del 8,25 MATLAB es la herramienta más adecuada para cumplir el objetivo de este proyecto. A pesar de que la licencia de MATLAB supone un alto coste económico, el programa incorpora una herramienta (GUIDE) bastante sencilla, intuitiva y fiable a la hora de diseñar interfaces gráficas de usuario. La posibilidad de diseño de una interfaz se presenta como factor determinante a la hora de elegir la herramienta. Entre los programas presentados MATLAB y PSCAD/EMTCD son los únicos que lo permiten. Entre estos dos la única diferencia es que la herramienta GUIDE es más sencilla e intuitiva que PSCAD/EMTCD.

Por lo tanto, la herramienta seleccionada para el desarrollo de una interfaz gráfica que, introduciendo los datos característicos de un transformador de potencia monofásico, así como las condiciones de carga en las que trabaja indique si se produce efecto Ferranti o no, será la herramienta **GUIDE** de **MATLAB**. Los resultados de las distintas opciones han sido:

- Mathcad ha obtenido un 4 sobre 10.
- MATLAB (Guide) ha obtenido un 8,25 sobre 10, siendo la seleccionada.
- ATP ha obtenido un 4 sobre 10.
- PSCAD/EMTDC ha obtenido 6 sobre 10.

7. DESCRIPCIÓN DE LA SOLUCIÓN

Una vez seleccionado MATLAB como herramienta para el desarrollo de la interfaz gráfica de usuario requerida para el cumplimiento de este Trabajo Fin de Grado, en este apartado se presenta una descripción de cómo se ha desarrollado dicha interfaz analizando las distintas funciones de la misma.

7.1. Breve introducción a GUIDE

GUIDE es una herramienta incorporada en MATLAB que permite de un forma fácil e intuitiva desarrollar interfaces gráficas de usuario.

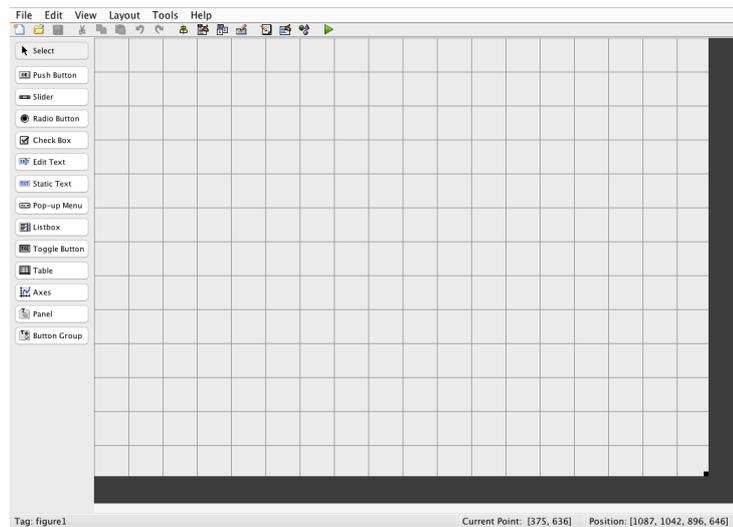


Figura 14. Entorno de creación de la interfaz gráfica

GUIDE permite añadir distintos elementos como botones, menús desplegables, casillas de selección, textos editables, textos estáticos, etc. En este proyecto los elementos utilizados para el desarrollo de la interfaz son los siguientes:

- *Panel* para organizar las distintas funciones del programa en módulos.
- *Edit* celdas donde introducir datos y texto.
- *Check Box* para seleccionar distintas acciones permitidas.
- *Push Button* para ejecutar distintas acciones.
- *Axes* para introducir gráficos a la interfaz.

Cada uno de estos elementos es programable en un *script* donde se le puede asignar una función determinada a cada uno de ellos. Este entorno de desarrollo también permite ejecutar la interfaz para ir observando la apariencia y resultados de la herramienta software realizada.

7.2. Interfaz gráfica de usuario

La interfaz desarrollada en este Trabajo Fin de Grado permite conocer la tensión real a la salida de un transformador monofásico alimentado a su tensión nominal ante unas condiciones de carga determinadas, así como el coeficiente de variación de tensión. Pero el objetivo principal de la herramienta software es determinar cuál es el ángulo límite de una carga capacitiva para el cual no se produce efecto Ferranti y ante estas condiciones de carga determinar si se produce dicho efecto y proporcionar el valor final de la tensión, así como su coeficiente de variación de tensión. También proporciona un gráfico donde se observa como varía el ángulo de Ferranti frente a distintos índices de carga. La interfaz tiene la siguiente apariencia:

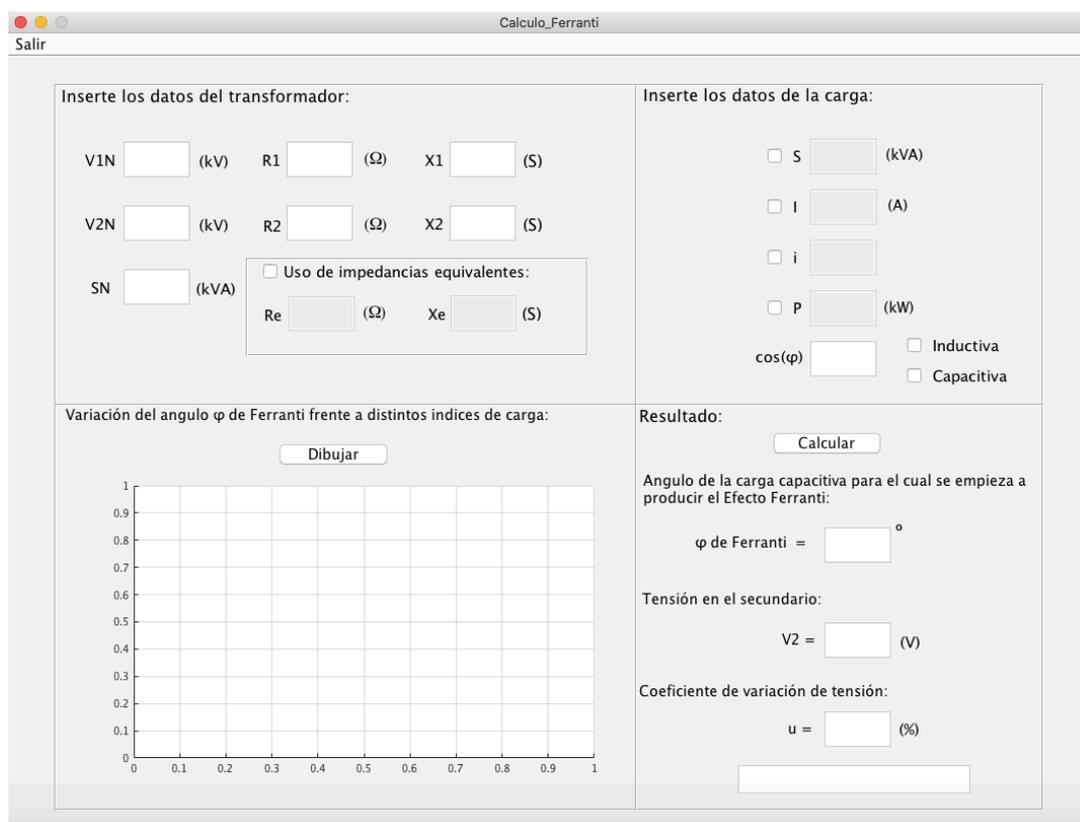


Figura 15. Apariencia de la interfaz gráfica de usuario.

La herramienta se compone de cuatro módulos. El primero (arriba izquierda) es donde se introducen los datos del transformador monofásico, las tensiones nominales del primario como del secundario, su potencia aparente nominal y los valores de las impedancias internas. El segundo módulo (abajo izquierda) pulsando el botón dibujar permite graficar la variación del ángulo de Ferranti frente a distintos índices de carga. El tercer módulo (arriba derecha) es donde se recogen los datos de la carga conectada,

dependiendo de los datos disponibles sobre la carga se puede introducir su potencia aparente, la intensidad que recorre la carga, el índice de carga al que se desea trabajar o la potencia activa de la carga. Es obligatorio indicar el factor de potencia de la carga, así como si es inductiva o capacitiva. Por último, el cuarto módulo (abajo derecha), es el panel de resultados donde si la carga es inductiva al no producirse efecto Ferranti indica cual es la tensión real del secundario y el coeficiente de variación de tensión. En el caso de que la carga sea capacitiva también aparece en este módulo el ángulo de Ferranti correspondiente y un mensaje indicando si para esa carga se produce dicho efecto.

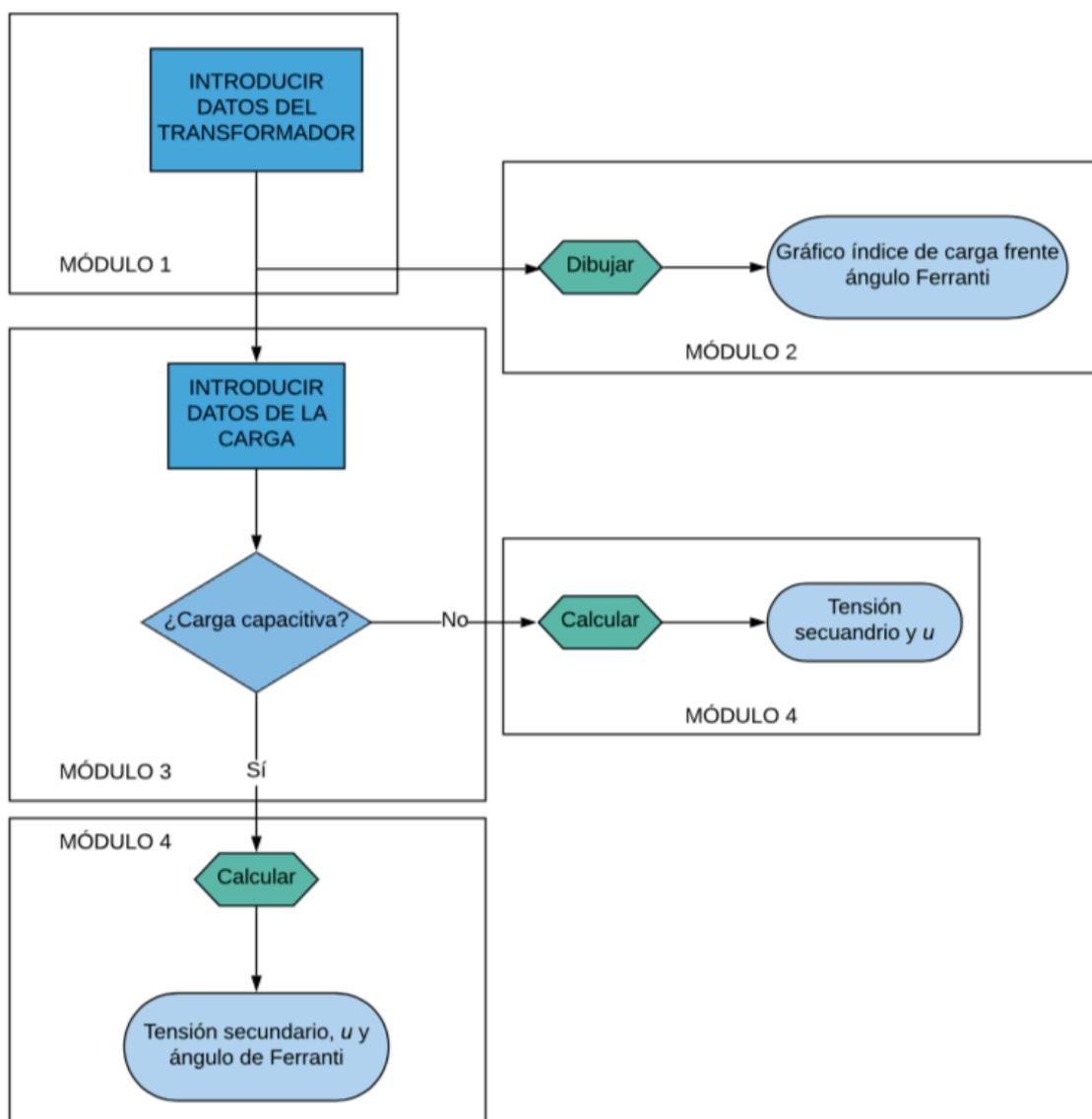


Figura 16. Diagrama de flujo de la interfaz gráfica (elaboración propia).

7.2.1. Módulo 1: Datos del transformador monofásico

Módulo donde se introducen datos del transformador monofásico (tensiones nominales, potencia aparente nominal e impedancias internas)

Inserte los datos del transformador:

V1N (kV) R1 (Ω) X1 (S)

V2N (kV) R2 (Ω) X2 (S)

SN (kVA)

Uso de impedancias equivalentes:

Re (Ω) Xe (S)

Figura 17. Módulo 1: Datos del transformador monofásico.

En este panel se deben introducir las tensiones nominales del transformador, la potencia aparente nominal y las impedancias internas del devanado primario y secundario. Si se desea, se permite la opción de introducir las impedancias equivalentes directamente.

Con la función *get* de MATLAB se obtiene el valor de cada dato introducido los *edit* del módulo. Con la función *str2double* se convierte a variable numérica para poder operar con el dato en el futuro y finalmente se asigna cada dato a una variable correspondiente.

- Para el caso de las tensiones nominales y potencia aparente nominal:

```
V1Nk = str2double(get(handles.tens_nom1, 'String'));
V2Nk = str2double(get(handles.tens_nom2, 'String'));
SNk = str2double(get(handles.potap_nom, 'String'));
```

- Para el caso de las impedancias del primario y secundario:

```
R1 = str2double(get(handles.resis1, 'String'));
R2 = str2double(get(handles.resis2, 'String'));
X1 = str2double(get(handles.admit1, 'String'));
X2 = str2double(get(handles.admit2, 'String'));
```

- Y en el caso de marcar el *Check Box* de las impedancia equivalentes:

```
Re = str2double(get(handles.resisEq, 'String'));
Xe = str2double(get(handles.admitEq, 'String'));
```

7.2.2. Módulo 2: Gráfico índice de carga frente ángulo Ferranti

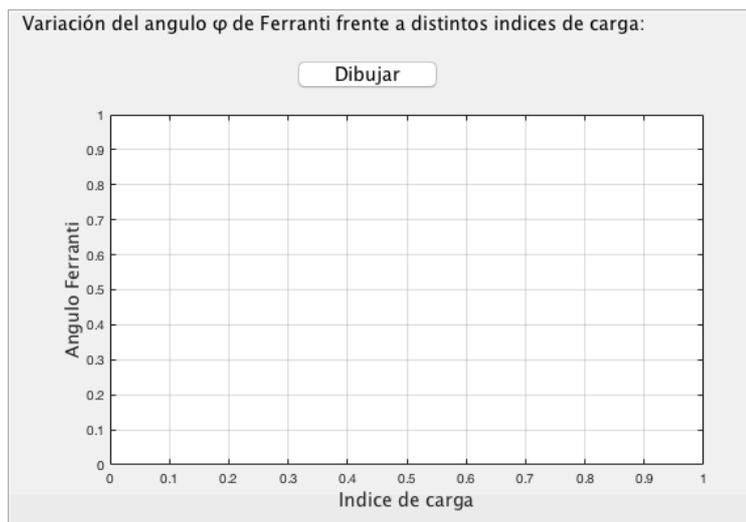


Figura 18. Módulo 2: Gráfico índice de carga frente ángulo Ferranti.

Una vez introducidos los datos del transformador pulsando el botón “Dibujar” se permite la opción de dibujar un gráfico que presente la variación del ángulo de Ferranti ante distintos índices de carga. Este módulo está formado por un *Push Button* “Dibujar” y un elemento *Axes* para introducir el gráfico.

Para realizar la programación de este módulo ha sido necesaria la fórmula del ángulo de Ferranti obtenida en el apartado 5.6.1. Sabiendo que el índice de carga de cualquier transformador está acotado entre 0 y 1 ($0 < i < 1$), se calcula un número finito de ángulos de Ferranti que después mediante el comando *plot* se grafican en el elemento *axes* del módulo. Para ver el código completo de este panel véase Anexo I.

7.2.3. Módulo 3: Datos de la carga

El módulo 3 es el panel donde se deben introducir los datos de la carga que se desea conectar al transformador monofásico. El objetivo del módulo 3 es conseguir el índice de carga (i) para obtener la tensión que recorrerá el secundario, dato imprescindible para conseguir el ángulo de Ferranti si la carga es capacitiva y el coeficiente de variación de tensión, a su vez necesario para obtener la tensión real en el secundario.

Para lograr el mencionado objetivo se permite introducir distintos datos dependiendo de la información de la carga que se disponga. Mediante distintos *Check Box* se puede introducir la potencia aparente de la carga, la intensidad que recorre la carga, el índice de carga o la potencia activa de la carga. Es necesario introducir el factor

de potencia e indicar obligatoriamente si la carga es capacitiva o inductiva seleccionando sus correspondientes *Check Box*.

Figura 19. Módulo 3: Datos de la carga.

A continuación, se expondrá el código de cómo se han obtenido las variables de los distintos *edit* para el cálculo de la intensidad (I_{2p}) que recorre la carga y del índice de carga (i), necesaria para la fórmula de ángulo de Ferranti demostrada en el apartado 5.6.1.

- Si se selecciona el *Check Box* de potencia aparente (S):

```
if checkboxpotapStatus == 1
    Sk = str2double(get(handles.potap_carga, 'String'));
    S = Sk*1000;
    i = S/SN;
    I2p = i*I1N;
end
```

- Si se selecciona el *Check Box* de intensidad (I):

```
if checkboxintensStatus == 1
    I2 = str2double(get(handles.intens_carga, 'String'));
    I2p = I2/a;
    i = I2p/I1N;
end
```

- Si se selecciona el *Check Box* de índice de carga (i):

```
if checkboxindcargaStatus == 1
    i = str2double(get(handles.indice_carga, 'String'));
    I2p = i*I1N;
end
```

- Si se selecciona el *Check Box* de potencia activa (P):

```
if checkboxPcosStatus == 1
    Pk = str2double(get(handles.Pact, 'String'));
    P = Pk*1000;
    S = P/cosfi;
    i = S/SN;
    I2p = i*I1N;
end
```

Seleccionando “Inductiva” o “Capacitiva” permitirá saber al problema que ecuación utilizar a la hora de calcular el índice de variación de tensión (u).

- Seleccionando *Check Box* inductiva:

```
if checkboxinductivaStatus == 1
    u = i*(uR*cosfi + uX*sinfi) + ((i^2)/200)*((uX*cosfi
    - uR*sinfi)^2);
end
```

- Seleccionando *Check Box* capacitiva:

```
if checkboxcapacitivaStatus == 1
    u = i*(uR*cosfi - uX*sinfi) + ((i^2)/200)*((uX*cosfi
    + uR*sinfi)^2);
    set(handles.angferranti, 'Enable', 'on');
end
```

Al seleccionar “capacitiva” con el comando *set* se da la orden al programa de que habilite el *edit* angulo de Ferranti del módulo 4 para mostrar su valor.

7.2.4. Módulo 4: Resultados

Introducidos todos los datos este módulo es donde se obtienen los resultados. Está compuesto por un botón “Calcular”, tres *edit* donde se aparecerán las distintas soluciones y un cuarto *edit* que mostrará: “No se produce efecto Ferranti” o “SE PRODUCE EFECTO FERRANTI”. Para ver el código completo véase *anexo II*.

Figura 20. Módulo 4: Resultados.

En el caso de que se haya marcado el *Check Box* de carga inductiva en el módulo anterior el programa desactivara el *edit* de ángulo de Ferranti. Cuando la carga es inductiva no se producirá efecto Ferranti en ningún caso. Por lo tanto, el mensaje mostrado en el último *edit* será: “No se produce efecto Ferranti”. Para este tipo de cargas la tensión en el secundario obtenida será menor que la tensión nominal introducida en el módulo 1. Se obtendrá un coeficiente de variación de tensión positivo.

En el caso de que en el módulo 3 se haya seleccionado la opción de carga capacitiva el *edit* de ángulo de Ferranti sí mostrará un valor calculado a partir de la ecuación obtenida en el *apartado 5.6.1*. Su código se muestra a continuación:

```

alfa = atan (Re/Xe);
beta = acos ((Ze*I2p)/(2*V1N));

firad = (pi/2)-(beta-alfa);

angferr = (firad*180)/pi;
    
```

MATLAB opera en radianes, por lo tanto, en la última fila de la fracción de código mostrada se convierte el ángulo a grados.

Para cargas capacitivas dependiendo del ángulo de la carga se obtendrán unos resultados u otros. Cuando el ángulo de la carga sea menor que el ángulo de Ferranti ($\varphi < \varphi_{\text{Ferranti}}$) el mensaje que mostrado será “No se produce efecto Ferranti”, por lo tanto, la tensión real en el secundario será menor que la tensión nominal introducida ($V_{2N} > V_2$) con un coeficiente de variación de tensión positivo ($u > 0$). En el caso de que $\varphi > \varphi_{\text{Ferranti}}$ ocurrirá que la tensión en el secundario será mayor que su tensión nominal ($V_{2N} < V_2$) con un coeficiente que mide la variación de tensión negativo ($u < 0$). En último *edit* se anuncia que si se produce efecto Ferranti.

7.2.5. Mensajes de error

La interfaz gráfica de usuario desarrollada muestra distintos mensajes de error programados utilizando la función *errordlg*. Al producirse el error también se ha programado que se vacíen todos lo *edit* de resultados con el comando *set*.

- Cuando el índice de carga (*i*) no está acotado entre 0 y 1 ($0 < i < 1$):



Figura 21. Mensaje de error para índices de carga no acotados entre 0 y 1.

```

if i > 1

    opts1 = struct('WindowState','modal','Interpreter','tex');
    errordlg('\fontsize{15}\fontname{Calibri} Indice de carga
(i) mayor que 1',...
            'ERROR',opts1);

    set(handles.angferranti,'String','');
    set(handles.tens_2,'String','');
    set(handles.coefvar_u,'String','');
    set(handles.anuncio_ferranti,'String','');

    clear angferr
    clear V2
    clear u

elseif i < 0

    opts1 = struct('WindowState','modal','Interpreter','tex');
    errordlg('\fontsize{15}\fontname{Calibri} Indice de carga
(i) menor que 0',...
            'ERROR',opts1);

    set(handles.angferranti,'String','');

```

```

set(handles.tens_2,'String','');
set(handles.coefvar_u,'String','');
set(handles.anuncio_ferranti,'String','');

clear angferr
clear V2
clear u
    
```

- Cuando el factor de potencia $\cos(\varphi)$ no está acotado entre 0 y 1 ($0 < \cos(\varphi) < 1$):

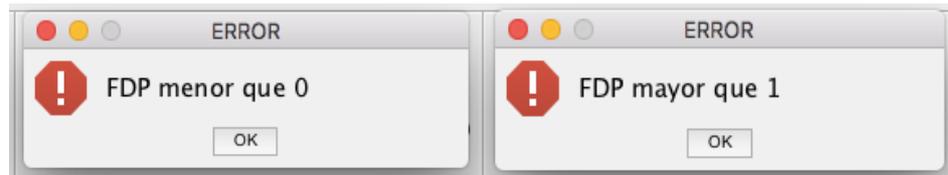


Figura 22. Mensaje de error para factores de potencia no acotados entre 0 y 1.

```

elseif cosfi > 1

    opts1 = struct('WindowStyle','modal','Interpreter','tex');
    errordlg('\fontsize{15}\fontname{Calibri} FDP mayor que
1',...
    'ERROR',opts1);

    set(handles.angferranti,'String','');
    set(handles.tens_2,'String','');
    set(handles.coefvar_u,'String','');
    set(handles.anuncio_ferranti,'String','');

    clear angferr
    clear V2
    clear u

elseif cosfi < 0

    opts1 = struct('WindowStyle','modal','Interpreter','tex');
    errordlg('\fontsize{15}\fontname{Calibri} FDP menor que
0',...
    'ERROR',opts1);

    set(handles.angferranti,'String','');
    set(handles.tens_2,'String','');
    set(handles.coefvar_u,'String','');
    set(handles.anuncio_ferranti,'String','');

    clear angferr
    clear V2
    clear u
    
```

7.2.6. Opción “Salir”

GUIDE permite añadir una barra de tareas en la parte superior de la ventana donde se pueden insertar diversos menús. Para el caso de la interfaz gráfica desarrollada en este proyecto se ha programado un botón que permite salir de la aplicación preguntando si de verdad se desea abandonar el programa. Si se selecciona “Si” se eliminarán todas las variables de la memoria y se cerrará la ventana del programa. En el caso de seleccionar “No” la herramienta se queda tal cual estaba.

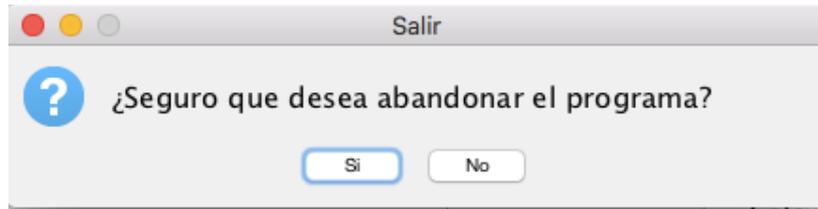


Figura 23. Mensaje de opción "Salir".

El código utilizado para esta opción obtenido de (10) se muestra a continuación con sus distintas funciones.

```
function menu_salir_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to menu_salir (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

options.Interpreter = 'tex';
options.Default = 'Si';
qstring = '\fontsize{15}\fontname{Calibri} ¿Seguro que desea
abandonar el programa?';
selection = questdlg (qstring, 'Salir', ...
                    'Si', 'No', options);

switch selection
case 'Si'
    if exist ('h0', 'var')

        delete (h0)
        clear h0
    end

    delete (gcbf)
    clear all
    clc

case 'No'

    return

end

end
```

8. EJEMPLOS DE APLICACIÓN

Para poner en valor la interfaz gráfica desarrollada en este Trabajo Fin de Grado en este apartado se expondrán dos ejemplos de cómo utilizar la herramienta. Cada ejemplo es un transformador de potencia monofásico sometido a condiciones de carga diferentes.

8.1. Ejemplo de aplicación 1

Un transformador monofásico 13.200V/230V tiene una resistencia equivalente interna de $R_e = 0.697 \Omega$ y una inductancia equivalente interna de $X_e = 6.935$. Su potencia aparente nominal es de 1000kVA. En primer lugar, está cargado con $i = 1$ y un $\cos(\varphi)$ igual a 0.8 inductivo. A continuación, se conecta una carga con el mismo i pero con $\cos(\varphi) = 0.8$ capacitivo. Para el caso de carga inductiva calcular la tensión de salida y el coeficiente de variación de tensión y para el caso de carga capacitiva la tensión de salida, el coeficiente de variación de tensión y el ángulo de Ferranti. Para este último caso indicar si se produce efecto Ferranti.

El primer paso es introducir los datos de tensiones nominales, potencia aparente e impedancias internas en el módulo 1. El problema nos facilita directamente las impedancias internas, por lo tanto, se introducen en sus *edit* correspondientes. Al introducir los datos se puede pulsar el botón “Dibujar” que hará que aparezca el gráfico que representa la variación del ángulo de Ferranti frente al índice de carga.

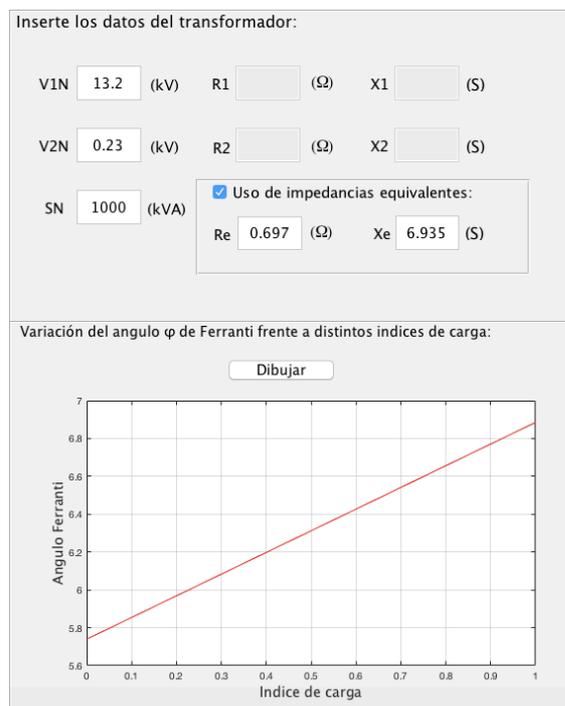


Figura 24. Ejemplo1: Datos del transformador y gráfico.

A continuación, se insertan los datos de la carga inductiva en su correspondientes *edit*. Pulsando el botón “Calcular” del módulo 4 aparecerán los distintos resultados para este tipo de carga.

Inserte los datos de la carga:

S (kVA)

I (A)

i

P (kW)

cos(φ) Inductiva Capacitiva

Resultado:

Angulo de la carga capacitiva para el cual se empieza a producir el Efecto Ferranti:

φ de Ferranti = °

Tensión en el secundario:

V2 = (V)

Coefficiente de variación de tensión:

u = (%)

Figura 25. Ejemplo 1: Datos de carga inductiva.

En la figura 25 se pueden observar los distintos resultados. Al ser una carga inductiva es obvio que no se va a producir efecto Ferranti. La tensión de salida es de 223.671V menor que su tensión nominal de 230V lo cual es lógico por lo que se ha demostrado anteriormente en el *apartado 5*. La variación es de 2.7514% mayor que 0.

Ahora se va a proceder a introducir los datos de la carga capacitiva proporcionados en el problema. Antes de pulsar el botón de calcular calculamos el ángulo de la carga para compararlo con el gráfico de la figura 24.

$$\varphi = \text{acos}(0.8) = 36.87^\circ$$

En el gráfico proporcionado en el módulo 2 se observa que para todos los índices de carga posibles ($0 < i < 1$) el ángulo de Ferranti variara entre 5.75° y 6.85° . Por lo

tanto, en el caso que nos atañe i es igual a 1 entonces el ángulo de Ferranti para dicho i será aproximadamente 6.85° . En ángulo de la carga capacitiva es mayor que el ángulo de Ferranti supuesto, se podría decir de antemano que si se producirá efecto Ferranti.

Inserte los datos de la carga:

S (kVA)

I (A)

i 1

P (kW)

cos(φ) 0.8 Inductiva Capacitiva

Resultado:

Calcular

Angulo de la carga capacitiva para el cual se empieza a producir el Efecto Ferranti:

φ de Ferranti = 6.8853 $^\circ$

Tensión en el secundario:

V2 = 234.621 (V)

Coefficiente de variación de tensión:

u = -2.0094 (%)

SE PRODUCE EFECTO FERRANTI

Figura 26. Ejemplo 1: Resultado para carga capacitiva.

Efectivamente como se ha predicho para este caso si se produce efecto Ferranti. La tensión de salida es de 234.621V mayor que su tensión nominal de 230V. Con índice de variación de tensión de -2.0094%. En ángulo de Ferranti exacto es de 6.8853° .

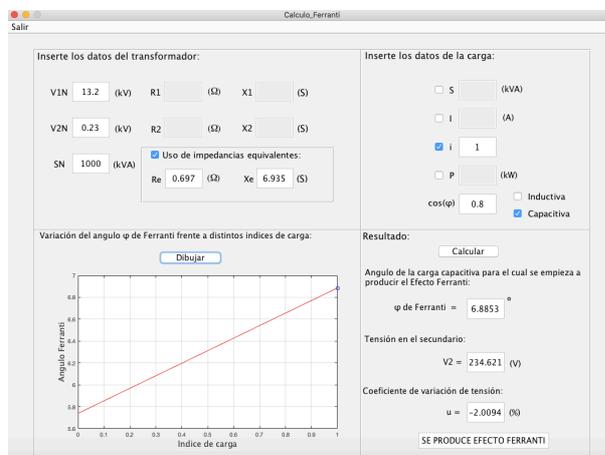


Figura 27. Vista general de la interfaz para el ejemplo 1 y carga capacitiva.

8.2. Ejemplo de aplicación 2.

Un transformador monofásico 13.200V/230V tiene una resistencia equivalente interna de $R_e = 1.5 \Omega$ y una inductancia equivalente interna de $X_e = 14.925$. Su potencia aparente nominal es de 1000kVA. En primer lugar, está conectado a una carga de potencia activa de 500kW y un factor de potencia $\cos(\varphi)$ igual a 0.8 inductivo. A continuación, se conecta una carga con la misma P pero con $\cos(\varphi) = 0.8$ capacitivo. Para el caso de carga inductiva calcular la tensión de salida y el coeficiente de variación de tensión y para el caso de carga capacitiva la tensión de salida, el coeficiente de variación de tensión y el ángulo de Ferranti. Para este último caso indicar si se produce efecto Ferranti.

Los pasos a seguir son los mismos que en el *ejemplo 1*. Primero se introducen los datos del transformador y se pulsa el botón “Dibujar”. Luego se introducen los datos de carga y se pulsa “Calcular”.

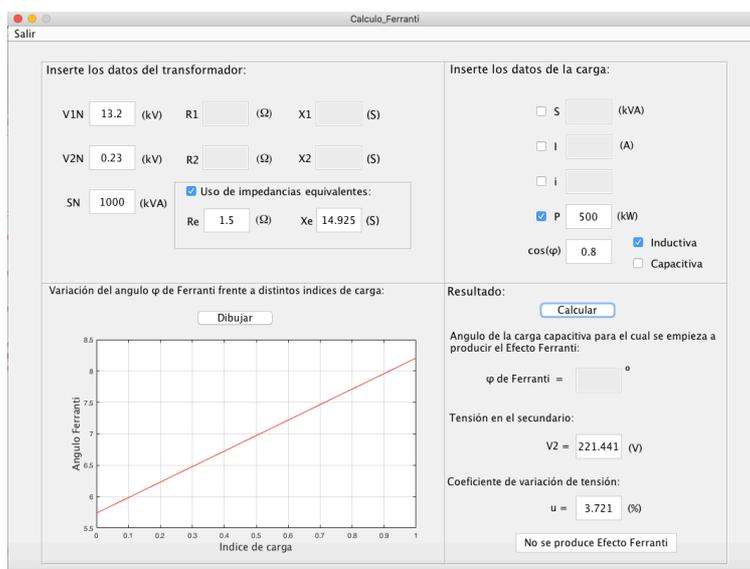


Figura 28. Ejemplo 2: Carga inductiva.

En la figura 28 se pueden observar los resultados para este tipo de carga. La tensión de salida será 221.441V con un coeficiente de variación de tensión de 3.721%. Al ser una carga inductiva, por un lado, se cumple que $V_2 < V_{2N}$ y por otro lado que $u > 0$. Es obvio que para este tipo de carga no se produzca efecto Ferranti.

A continuación, se cambia de opción de inductiva a capacitiva para representar el cambio de carga. Como los datos del transformador no varían no es necesario volver a pulsar “Dibujar”. Como se ha realizado en el *ejemplo 1*, antes de proseguir se

realizarán unas aclaraciones. Podemos calcular el ángulo de la carga capacitiva para compararlo con el rango de ángulos obtenidos en gráfico.

$$\varphi = \arccos(0.8) = 36.87^\circ$$

El rango de ángulos va desde 5.5° hasta aproximadamente 8.3° para $i = 1$. En ángulo de la carga es mayor que el límite superior por lo tanto se puede concluir que si se producirá efecto Ferranti. Se comprueba pulsando el botón de “Calcular”.

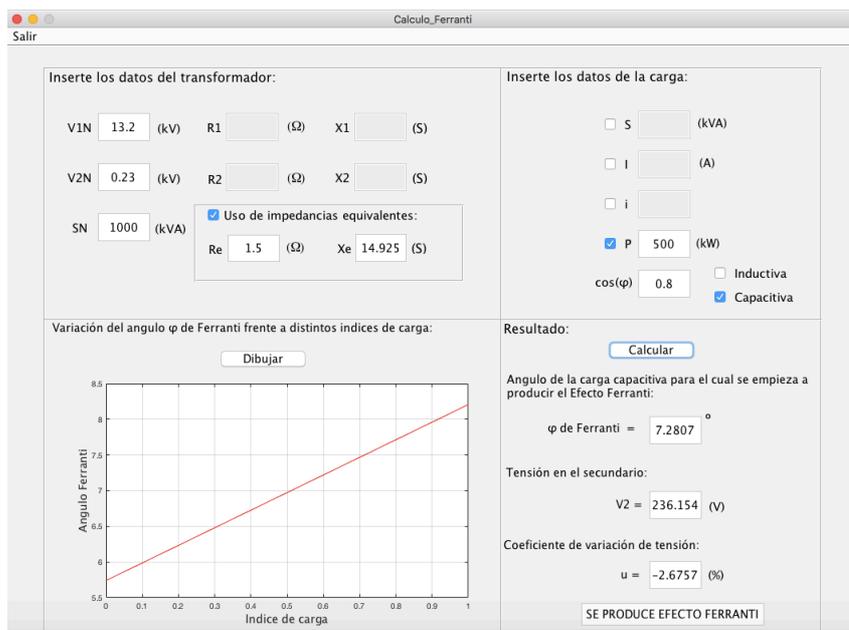


Figura 29. Ejemplo 2: Carga capacitiva.

El ángulo de Ferranti para esta carga capacitiva con factor de potencia 0.8 es de 7.2087° . La tensión de salida es de 236.154V mayor que su tensión nominal de 230V con un índice de variación de tensión de -2.6757%. Y como se había deducido antes de calcular los resultados y observando el gráfico si se produce efecto Ferranti y así lo anuncia el ultimo *edit* del módulo 4.

9. DESCRIPCIÓN DE TAREAS. DIAGRAMA GANTT

A continuación, se mencionan y describen las tareas necesarias para la realización del TFG. El equipo de trabajo que ha participado en la realización de este proyecto han sido un ingeniero senior (director del TFG) y un ingeniero junior (alumno que realiza el TFG).

- **Investigación:** La fecha de comienzo del proyecto fue el 15 de enero de 2018, con la primera reunión entre el ingeniero senior y el ingeniero junior. En dicha reunión el ingeniero senior dicta los pasos a seguir al ingeniero junior para el comienzo del TFG. En esta fase el ingeniero junior empieza la investigación sobre el tema del TFG recopilando información de distintas fuentes. La etapa acaba el 6 de febrero de 2018.
- **Análisis de la información obtenida:** El 6 de febrero de 2018 se realiza la segunda reunión entre ambos ingenieros. El ingeniero senior valida la investigación realizada por el junior. Se comienza con el análisis de la información obtenida para clasificar lo verdaderamente relevante. Esta fase acaba el 28 de febrero de 2018.
- **Desarrollo de la interfaz gráfica de usuario:** La fase de análisis se da por concluida en la tercera reunión el 28 de febrero de 2018 donde se verifica la utilidad de la información clasificada. El ingeniero senior indica nuevas pautas para el desarrollo de la interfaz gráfica al ingeniero junior. Durante el desarrollo de la interfaz gráfica de usuario se realiza una cuarta reunión el 23 de marzo de 2018 para comprobar que el proceso va en buen camino. Esta etapa se da por finalizada el 11 de abril de 2018.
- **Redacción del documento escrito:** En la quinta reunión del 11 de abril de 2018 el ingeniero senior da por válida la interfaz gráfica de usuario desarrollada por el ingeniero junior. Se da paso a la última etapa que consta con la escritura de la memoria del TFG. Esta fase se da por terminada el 22 de junio de 2018 cuando se termina la memoria y el ingeniero senior da luz verde al ingeniero junior para la entrega del TFG.

Para poder visualizar el flujo de tareas realizado durante la realización de este TFG se ha utilizado un Diagrama de Gantt que se muestra en la siguiente figura.

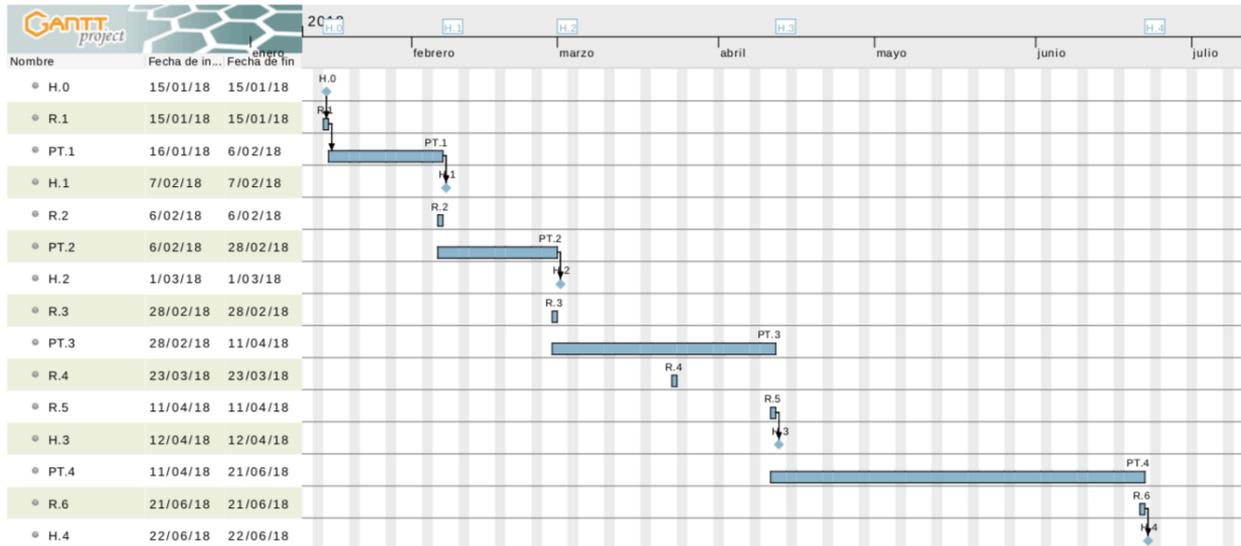


Figura 30. Diagrama de Gantt.

Por último, se han tabulado los símbolos de cada fase con su descripción correspondiente.

Nombre	Descripción	Fecha inicio	Fecha fin
H.0	Inicio del proyecto	15/01/2018	15/01/2018
R.1	Primera reunión	15/01/2018	15/01/2018
PT.1	Investigación	16/01/2018	06/02/2018
H.1	Fin de investigación	07/02/2018	07/02/2018
R.2	Segunda reunión	06/02/2018	06/02/2018
PT.2	Análisis de la información	06/02/2018	28/02/2018
H.2	Fin de análisis de información	01/03/2018	01/03/2018
R.3	Tercera reunión	28/02/2018	28/02/2018
PT.3	Desarrollo de la interfaz gráfica de usuario	28/02/2018	11/04/2018
R.4	Cuarta reunión	23/03/2018	23/03/2018
R.5	Quinta reunión	11/04/2018	11/04/2018
H.3	Fin del desarrollo de la interfaz gráfica de usuario	12/04/2018	12/04/2018
PT.4	Redacción del documento escrito	11/04/2018	21/06/2018
R.6	Ultimo reunión	21/06/2018	21/06/2018
H.4	Fin del proyecto	22/06/2018	22/06/2018

Tabla 3. Descripción de los elementos del Diagrama Gantt.

10. PARTIDAS PRESUPUESTARIAS

El presupuesto de este proyecto se engloba en tres partidas. La primera son las horas internas que incluyen las horas de trabajo de un ingeniero superior y un ingeniero senior. La segunda partida son las amortizaciones que incluyen la licencia de office, la licencia de MATLAB y el ordenador. Por último, estarían los gastos de material de oficina realizados. También se tiene en cuenta que los costes indirectos representan un 6% del presupuesto.

HORAS INTERNAS			
Concepto	Nº de horas	€/horas	Total
Ingeniero superior	40h	50€/h	2.000 €
Ingeniero graduado	200h	25€/h	5.000 €
SUBTOTAL			7.000 €

Tabla 4. Partida de horas internas.

AMORTIZACIONES				
Concepto	Precio producto	Vida útil (horas)	Utilización (horas)	Total
Licencia MATLAB	70 €	1600h	80h	3,50 €
Licencia Office	150 €	3000h	160h	8,00 €
Ordenador	1.200 €	20000h	240h	14,40 €
SUBTOTAL				25,90 €

Tabla 5. Partida de amortizaciones.

GASTOS	
Concepto	Total
Material de oficina	20 €
SUBTOTAL	20 €

Tabla 6. Partida de gastos.

RESUMEN	
Horas internas	7.000 €
Amortizaciones	25,90 €
Gastos	20 €
SUBTOTAL	7.045,90 €
Costes indirectos (6%)	422,75 €
TOTAL	7468,65 €

Tabla 7. Resumen del presupuesto.

11. CONCLUSIONES

El efecto Ferranti es un fenómeno que puede darse en los transformadores y al que hay que prestar especial atención para asegurarse que este tipo de máquinas funcione correctamente. El buen funcionamiento de los transformadores se traduce en un suministro de energía eléctrica de calidad y fiable.

Las protecciones del transformador están diseñadas para soportar los valores nominales de tensión e intensidad durante un tiempo indefinido. Por eso al producirse el efecto Ferranti la tensión de salida es mayor que su tensión nominal. Esto podría quemar las protecciones, haciendo fallar el transformador. Por lo tanto, detectar el efecto Ferranti es esencial para garantizar el buen funcionamiento en la máquina alterna.

Disponer de una herramienta que permita detectar el efecto Ferranti de un modo que se pueda evitar antes de que se produzca sería de gran ayuda para los ingenieros eléctricos encargados del diseño de transformadores. Una herramienta que permita evitarlo diseñando correctamente las protecciones y demás elementos del transformador sabiendo de ante mano cuáles serán las condiciones de carga del mismo.

En este Trabajo Fin de Grado se ha desarrollado una herramienta software cuya función principal es calcular el ángulo capacitivo para el cual se empieza a producir efecto Ferranti en un transformador de potencia monofásico y así predecir si se produce el mencionado efecto. También indica cual será el valor de la tensión de salida de la máquina y su coeficiente de variación de tensión tanto para cargas capacitivas como inductivas.

12. REFERENCIAS

1. **José Felix Miñambres, y otros.** *Guía de Autoaprendizaje de Máquinas Eléctricas.* Madrid : Pearson Educación S.A, 2008. 978-84-8322-490-8.
2. **Cherta, Manuel Cortés, Martín, Juan Corrales y Badía, Alfonso Enseñat.** *Teoría General de Maquinas Eléctricas.* Madrid : Universidad Nacional de Educación a Distancia, 1991. 84-362-0638-X.
3. **Feito, Javier Sanz.** *Máquinas Eléctricas.* Madrid : Pearson Educación S.A, 2002. 84-205-3391.
4. **Fitzgerald, A. E., Jr, Charles Kingsley y Umans, Stephen D.** *Máquinas Eléctricas.* México D.F. : McGraw-Hill/ Interamericana Editores, S.A, 2004. 970-10-4052-X.
5. **Navarro, Rafael Sanjurjo.** *Máquinas Eléctricas.* Madrid : García-Maroto Editores S.L, 2011. 978-84-15214-14-4.
6. **Chapman, Stephen J.** *Máquinas Eléctricas.* Bogotá : McGraw-Hill Interamericana S.A, 2000. 958-41-0056-4.
7. **Wildi, Theodore.** *Electrical Machines, Drives, And Power Systems.* Upper Saddle River : Pearson Education International, 2006. 0-13-196918-8.
8. **Iribarnegaray, Luis Serrano y Román, Javier Martínez.** *Máquinas Eléctricas.* s.l. : Editorial Universitat Politècnica de València, 2013. 978-84-9048-165-3.
9. **Ras, Enrique.** *Transformadores de Potencia, de Medida y de Protección.* Barcelona : Marcombo Boixareu Editores, 1994. 84-267-0690-8.
10. **Belver, M^a Inmaculada Zamora, y otros.** *Simulación de Sistemas Eléctricos.* Madrid : Pearson Educación S.A, 2005. 84-205-4808-1.

13. ANEXO I. CÓDIGO DEL MÓDULO 2

```

%-----
%-----PUSH DIBUJAR -----
%-----
% --- Executes on button press in push_dibujar.
function push_dibujar_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject      handle to push_dibujar (see GCBO)
% eventdata    reserved - to be defined in a future version of
MATLAB
% handles      structure with handles and user data (see GUIDATA)

% PRIMERO SE OBTIENE EL VALOR NUMERICO DE LOS DATOS DEL TRAFIO

V1Nk = str2double(get(handles.tens_nom1, 'String'));
V2Nk = str2double(get(handles.tens_nom2, 'String'));
SNk  = str2double(get(handles.potap_nom, 'String'));
cosfi = str2double(get(handles.cosfii, 'String'));
a = V1Nk/V2Nk;

V1N = V1Nk*1000;
SN  = SNk*1000;

I1N = SN/V1N;

checkboximpeqStatus = get(handles.checkbox_impeq, 'Value');

if checkboximpeqStatus == 1

    Re = str2double(get(handles.resisEq, 'String'));
    Xe = str2double(get(handles.admitEq, 'String'));

else

    R1 = str2double(get(handles.resis1, 'String'));
    R2 = str2double(get(handles.resis2, 'String'));
    X1 = str2double(get(handles.admit1, 'String'));
    X2 = str2double(get(handles.admit2, 'String'));

    R2p = R2*(a^2);
    X2p = X2*(a^2);

    Re = R1 + R2p;
    Xe = X1 + X2p;

end

Ze = sqrt((Re^2)+(Xe^2));

% DEPENDIENDO EL DATO DE CARGA INTRODUCIDO CALCULAR DE UNA
MANERA U OTRA
% EL INDICE DE CARGA Y LA INTESIDAD
    
```

```
checkboxpotapStatus = get(handles.checkbox_potap, 'Value');  
checkboxintensStatus = get(handles.checkbox_intens, 'Value');  
checkboxindcargaStatus =  
get(handles.checkbox_indicecarga, 'Value');  
checkboxPcosStatus = get(handles.checkbox_Pcos, 'Value');
```

```
if checkboxpotapStatus == 1
```

```
    Sk = str2double(get(handles.potap_carga, 'String'));
```

```
    S = Sk*1000;
```

```
    i = S/SN;
```

```
    I2p = i*I1N;
```

```
    alfa = atan (Re/Xe);
```

```
    beta = acos ((Ze*I2p)/(2*V1N));
```

```
    firad = (pi/2)-(beta-alfa);
```

```
    angferr = (firad*180)/pi;
```

```
end
```

```
if checkboxintensStatus == 1
```

```
    I2 = str2double(get(handles.intens_carga, 'String'));
```

```
    I2p = I2/a;
```

```
    i = I2p/I1N;
```

```
    alfa = atan (Re/Xe);
```

```
    beta = acos ((Ze*I2p)/(2*V1N));
```

```
    firad = (pi/2)-(beta-alfa);
```

```
    angferr = (firad*180)/pi;
```

```
end
```

```
if checkboxindcargaStatus == 1
```

```
    i = str2double(get(handles.indice_carga, 'String'));
```

```
    I2p = i*I1N;
```

```
    alfa = atan (Re/Xe);
```

```
    beta = acos ((Ze*I2p)/(2*V1N));
```

```
    firad = (pi/2)-(beta-alfa);
```

```
    angferr = (firad*180)/pi;
```

```
end
```

```

if checkboxPcosStatus == 1

    Pk = str2double(get(handles.Pact, 'String'));

    P = Pk*1000;
    S = P/cosfi;
    i = S/SN;
    I2p = i*I1N;

    alfa = atan (Re/Xe);
    beta = acos ((Ze*I2p)/(2*V1N));

    firad = (pi/2)-(beta-alfa);

    angferr = (firad*180)/pi;
end

% SE DIBUJA LA VARIACIÓN DEL ANGULO DE FERRANTI EN FUNCIÓN DEL
IND DE CARGA

angferrExist = exist('angferr','var');

ii = 0:0.05:1;

I2pp = ii*I1N;

alfa1 = atan (Re/Xe);
beta1 = acos ((Ze*I2pp)/(2*V1N));

firad1 = (pi/2)-(beta1-alfa1);

angferr1 = (firad1*180)/pi;

angferr1Exist = exist('angferr1','var');

if angferr1Exist == 1

    plot (ii,angferr1,'r');
end

if angferrExist == 1

    plot (ii,angferr1,'r',i,angferr,'bo');

end

ylabel ('Angulo Ferranti','FontSize',14,'FontName','Calibri');
xlabel ('Indice de carga','FontSize',14,'FontName','Calibri');
grid on
%-----
-----

```

14. ANEXO II. CÓDIGO DEL MÓDULO 4

```

%-----
%-----PUSH CALCULAR -----
%-----
% --- Executes on button press in push_calcferr.
function push_calcferr_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to push_calcferr (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of
MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

% PRIMERO SE OBTIENE EL VALOR NUMERICO DE LOS DATOS DEL TRAFIO

V1Nk = str2double(get(handles.tens_nom1, 'String'));
V2Nk = str2double(get(handles.tens_nom2, 'String'));
SNk   = str2double(get(handles.potap_nom, 'String'));
cosfi = str2double(get(handles.cosfii, 'String'));
V1N   = V1Nk*1000;
V2N   = V2Nk*1000;
SN    = SNk*1000;

I1N = SN/V1N;
I2N = SN/V2N;

a = V1N/V2N;

checkboximpeqStatus = get(handles.checkbox_impeq, 'Value');

if checkboximpeqStatus == 1

    Re = str2double(get(handles.resisEq, 'String'));
    Xe = str2double(get(handles.admitEq, 'String'));

else

    R1 = str2double(get(handles.resis1, 'String'));
    R2 = str2double(get(handles.resis2, 'String'));
    X1 = str2double(get(handles.admit1, 'String'));
    X2 = str2double(get(handles.admit2, 'String'));

    assignin ('base', 'R1', R1);
    assignin ('base', 'R2', R2);
    assignin ('base', 'X1', X1);
    assignin ('base', 'X2', X2);

    R2p = R2*(a^2);
    X2p = X2*(a^2);

    Re = R1 + R2p;
    Xe = X1 + X2p;

end

Ze = sqrt((Re^2)+(Xe^2));

```

```
% DEPENDIENDO EL DATO DE CARGA INTRODUCIDO CALCULAR DE UNA  
MANERA U OTRA  
% EL INDICE DE CARGA Y LA INTENSIDAD
```

```
checkboxpotapStatus = get(handles.checkbox_potap, 'Value');  
checkboxintensStatus = get(handles.checkbox_intens, 'Value');  
checkboxindcargaStatus =  
get(handles.checkbox_indicecarga, 'Value');  
checkboxPcosStatus = get(handles.checkbox_Pcos, 'Value');
```

```
if checkboxpotapStatus == 1
```

```
    Sk = str2double(get(handles.potap_carga, 'String'));
```

```
    S = Sk*1000;
```

```
    i = S/SN;
```

```
    I2p = i*I1N;
```

```
end
```

```
if checkboxintensStatus == 1
```

```
    I2 = str2double(get(handles.intens_carga, 'String'));
```

```
    I2p = I2/a;
```

```
    i = I2p/I1N;
```

```
end
```

```
if checkboxindcargaStatus == 1
```

```
    i = str2double(get(handles.indice_carga, 'String'));
```

```
    I2p = i*I1N;
```

```
end
```

```
if checkboxPcosStatus == 1
```

```
    Pk = str2double(get(handles.Pact, 'String'));
```

```
    P = Pk*1000;
```

```
    S = P/cosfi;
```

```
    i = S/SN;
```

```
    I2p = i*I1N;
```

```
end
```

```
alfa = atan (Re/Xe);
```

```
beta = acos ((Ze*I2p)/(2*V1N));
```

```
firad = (pi/2)-(beta-alfa);
```

```

angferr = (firad*180)/pi;

% TNESIÓN EN EL SECUNDARIO (V2) Y COEFICIENTE DE VARIACION DE
TENSIÓN (u)

fi = acos(cosfi);
sinfi = sin(fi);

uR = ((Re*I1N)/V1N)*100;
uX = ((Xe*I1N)/V1N)*100;

% Diferencio entre carga inductiva o capacitiva se calcula u

checkboxinductivaStatus = get(handles.checkbox_induct,'Value');
checkboxcapacitivaStatus =
get(handles.checkbox_capacit,'Value');

if checkboxinductivaStatus == 1

    u = i*(uR*cosfi + uX*sinfi) + ((i^2)/200)*((uX*cosfi -
uR*sinfi)^2);

end

if checkboxcapacitivaStatus == 1

    u = i*(uR*cosfi - uX*sinfi) + ((i^2)/200)*((uX*cosfi +
uR*sinfi)^2);
    set(handles.angferranti,'Enable','on');
end

if cosfi == 1

    u = i*(uR*cosfi - uX*sinfi) + ((i^2)/200)*((uX*cosfi +
uR*sinfi)^2);
end

% Una vez calculado u se cálcula V2

V2 = V2N*(1 - (u/100));

if V2 > V2N

    str1 = 'SE PRODUCE EFECTO FERRANTI';
    set(handles.anuncio_ferranti,'String',str1);

else

    str2 = 'No se produce Efecto Ferranti';
    set(handles.anuncio_ferranti,'String',str2);

end

% -----SE MUESTRAN TODOS LOS RESULTADOS-----

```

```

if angferr > 90

    opts = struct('WindowStyle','modal','Interpreter','tex');
    errordlg('\fontsize{15}\fontname{Calibri} \Phi > 90°, no se
produce Efecto Ferranti',...
        'ERROR',opts);

    set(handles.angferranti,'String','');

    clear angferr

end

if i > 1

    opts1 = struct('WindowStyle','modal','Interpreter','tex');
    errordlg('\fontsize{15}\fontname{Calibri} Indice de carga
(i) mayor que 1',...
        'ERROR',opts1);

    set(handles.angferranti,'String','');
    set(handles.tens_2,'String','');
    set(handles.coefvar_u,'String','');
    set(handles.anuncio_ferranti,'String','');

    clear angferr
    clear V2
    clear u

elseif i < 0

    opts1 = struct('WindowStyle','modal','Interpreter','tex');
    errordlg('\fontsize{15}\fontname{Calibri} Indice de carga
(i) menor que 0',...
        'ERROR',opts1);

    set(handles.angferranti,'String','');
    set(handles.tens_2,'String','');
    set(handles.coefvar_u,'String','');
    set(handles.anuncio_ferranti,'String','');

    clear angferr
    clear V2
    clear u

elseif cosfi > 1

    opts1 = struct('WindowStyle','modal','Interpreter','tex');
    errordlg('\fontsize{15}\fontname{Calibri} FDP mayor que
1',...
        'ERROR',opts1);

    set(handles.angferranti,'String','');
    set(handles.tens_2,'String','');
    set(handles.coefvar_u,'String','');

```

```

    set(handles.anuncio_ferranti,'String','');

    clear angferr
    clear V2
    clear u

elseif cosfi < 0

    opts1 = struct('WindowState','modal','Interpreter','tex');
    errorldg('\fontsize{15}\fontname{Calibri} FDP menor que
0',...
        'ERROR',opts1);

    set(handles.angferranti,'String','');
    set(handles.tens_2,'String','');
    set(handles.coefvar_u,'String','');
    set(handles.anuncio_ferranti,'String','');

    clear angferr
    clear V2
    clear u

elseif checkboxinductivaStatus == 1

    set(handles.angferranti,'Enable','off');
    set(handles.angferranti,'String','')
    set(handles.coefvar_u,'String',num2str(u));
    set(handles.tens_2,'String',num2str(V2));

elseif cosfi == 1

    set(handles.angferranti,'Enable','off');
    set(handles.angferranti,'String','')
    set(handles.coefvar_u,'String',num2str(u));
    set(handles.tens_2,'String',num2str(V2));

else

    set(handles.angferranti,'String',num2str(angferr));
    set(handles.coefvar_u,'String',num2str(u));
    set(handles.tens_2,'String',num2str(V2));

    assignin ('base','angferr',angferr);

end

% PASAMOS TODAS LAS VARIABLE AL WORKSPACE

assignin ('base','V1N',V1N);
assignin ('base','V2N',V2N);
assignin ('base','SN',SN);
assignin ('base','I1N',I1N);
assignin ('base','I2N',I2N);
assignin ('base','Re',Re);
assignin ('base','Xe',Xe);

```

```
assignin ('base', 'Ze', Ze);  
assignin ('base', 'I2p', I2p);  
assignin ('base', 'i', i);
```