

GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍA
INDUSTRIAL

TRABAJO FIN DE GRADO

*DISEÑO DE UNA APLICACIÓN
SOFTWARE PARA EL CÁLCULO DEL
ACOPLAMIENTO EN PARALELO DE
TRANSFORMADORES*

Alumno: Sanz Magadán, Mikel Iñaki

Director: Valverde Santiago, Víctor

Curso: 2018-2019

Fecha: 16 de julio de 2019

Trabajo de Fin de Grado (TFG): Diseño de una aplicación software para el cálculo del acoplamiento en paralelo de transformadores.

DATOS BÁSICOS DEL TRABAJO DE FIN DE GRADO

Alumno: Sanz Magadán, Mikel Iñaki

Director: Valverde Santiago, Víctor

Centro: Escuela de Ingeniería de Bilbao

Departamento: Ingeniería Eléctrica

Área de conocimiento: Ingeniería Eléctrica

Título: Diseño de una aplicación software para el cálculo del acoplamiento en paralelo de transformadores.

Resumen: el objetivo principal del presente trabajo es el cálculo de parámetros de funcionamiento y la obtención de las condiciones de carga de un grupo de transformadores de potencia acoplados en paralelo. Se ha desarrollado para ello una aplicación software en el entorno de Matlab, la cual permite calcular dichos parámetros a partir de información introducida previamente por el usuario como datos de la red y datos de diseño característicos de los transformadores acoplados.

Palabras clave: transformador, acoplamiento en paralelo, interfaz gráfica, Matlab, condiciones de carga, parámetros de funcionamiento.

Izenburua: Paraleloan akoplaturiko transformadoreen parametroen kalkulurako software aplikazio baten diseinua.

Laburpena: lan honen helburu nagusia paraleloan akoplaturiko potentzia transformadore talde baten funtzionamenduaren parametroak kalkulatzeko eta hauen karga baldintzak lortzea da. Horretarako Matlab-en oinarrituriko software aplikazio bat garatu da, parametro hauek kalkulatzeko ahalbidetzen duena, aurretik erabiltzaileak sarturiko informazioaz baliatuz; sarearen datuez eta transformadore akoplatuen diseinu datuez, besteak beste.

Hitzgakoak: transformadore, paraleloan akoplatze, interfaze grafiko, Matlab, karga baldintza, funtzionamendu parametro.

Title: Design of a software app for parameter calculation of parallel-connected transformers.

Abstract: the main goal of this Project is to calculate working parameters and load conditions of a parallel-operating power transformer group. To this end, a Matlab-based software app was developed, which allows the calculation of these parameters based on data previously introduced by the user, such as data from the power grid and characteristic design parameters of the connected transformers.

Keywords: transformer, parallel operation, graphic interface, Matlab, load conditions, working parameters.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

1. INTRODUCCIÓN	9
2.1. El Sistema Eléctrico de Potencia	10
2.2. El transformador de potencia	11
3. OBJETIVOS Y ALCANCE	13
4. BENEFICIOS DEL PROYECTO	14
4.1. Beneficios técnicos	14
4.2. Beneficios económicos	14
4.3. Beneficios sociales	15
5. ESTADO DEL ARTE	16
5.1. Transformador de potencia monofásico	16
5.1.1. Principio de funcionamiento	17
5.2. Transformador monofásico real en carga	18
5.3. Reducción de valores de secundario a primario	21
5.4. Circuito equivalente del transformador	21
5.5. Valores nominales del transformador.....	23
5.6. Fundamentos de transformadores trifásicos	23
5.6.1. Tipos de conexiones.....	24
5.6.2. Grupos de conexión	24
5.7. Acoplamiento en paralelo de transformadores.....	25
5.7.1. Condiciones para el acoplamiento de transformadores monofásicos	26
5.7.2. Condiciones para el acoplamiento de transformadores trifásicos	26
5.7.3. Reparto de potencias en el acoplamiento de transformadores.....	29
6. ANÁLISIS DE ALTERNATIVAS	31
6.1. Técnicas de carácter correctivo, preventivo y predictivo	31
6.1.1. Técnicas de carácter correctivo	31
6.1.2. Técnicas de carácter preventivo.....	31
6.1.3. Técnicas de carácter predictivo.....	32
6.2. Análisis de alternativas para el estudio del acoplamiento en paralelo	32
6.2.1. Ensayos en los transformadores.....	33
6.2.2. Modelos físicos a escala	33
6.2.3. Simulación software	33
6.2.4. Criterios de selección.....	34
6.2.5. Resultados del análisis	34
6.3. Selección de la herramienta software.....	35
6.3.1. PSCAD / EMTDC.....	36
6.3.2. Visual Basic.....	36

6.3.3. Mathcad	36
6.3.4. Matlab – GUIDE	36
6.3.5. Criterios de selección	36
6.3.6. Resultados del análisis	37
7. DESCRIPCIÓN DE LA SOLUCIÓN.....	39
7.1. La herramienta GUIDE de Matlab	39
7.2. La interfaz gráfica desarrollada.....	40
7.2.1. Paneles de los transformadores	42
7.2.2. Paneles de red, carga e impedancia interna del transformador	43
7.2.3. Paneles de las condiciones de carga de los transformadores	44
7.2.4. Panel de otros datos de interés	45
7.2.4. Cálculo de los parámetros de carga.....	46
7.2.5. Cálculo de la caída de tensión	48
7.2.6. Resumen del funcionamiento de la interfaz gráfica	49
8. EJEMPLOS PRÁCTICOS DE APLICACIÓN.....	51
8.1. Ejemplo de aplicación 1	51
8.2. Ejemplo de aplicación 2.....	53
9. DESCRIPCIÓN DE TAREAS	56
10. PRESUPUESTO.....	57
11. CONCLUSIONES.....	58
12. REFERENCIAS	59
13. ANEXO – CÓDIGO DE LA INTERFAZ GRÁFICA.....	60

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Esquema del Sistema Eléctrico de Potencia (SEP). [2]	10
Figura 2. Transformador de potencia.	11
Figura 3. Partes activas de un transformador de potencia.	17
Figura 4. Visualización de los flujos de fugas en los devanados.	19
Figura 5. Esquema de un transformador conectado a carga.	19
Figura 6. Circuito equivalente del transformador. [5]	22
Figura 7. Circuito equivalente simplificado del transformador.	22
Figura 8. Circuito magnético de un transformador trifásico.	24
Figura 9. Tipos de conexiones en transformadores triásicos. [5]	24
Figura 10. Índices horarios equivalentes.	25
Figura 11. Acoplamiento de transformadores del mismo índice horario.	27
Figura 12. Conexión de transformadores de grupos C y D. Grupo resultante D. 28	
Figura 13. Circuito equivalente de dos transformadores en paralelo.	29
Figura 14. Entorno de la herramienta GUIDE de Matlab.	39
Figura 15. Entorno de trabajo en GUIDE: diseño de la aplicación.	41
Figura 16. Apariencia de la interfaz gráfica de usuario.	41
Figura 17. Paneles de los transformadores.	42
Figura 18. Paneles de red, carga e impedancia interna.	43
Figura 19. Panel de las condiciones de carga de los transformadores.	45
Figura 20. Panel de otros datos de interés del grupo.	45
Figura 21. Mensaje de advertencia de sobretensión.	47
Figura 22. Mensaje de advertencia sobre las relaciones de transformación.	47
Figura 23. Mensaje de advertencia de transformadores no conectados.	48
Figura 24. Diagrama de flujo del funcionamiento de la interfaz.	50
Figura 25. Ejemplo 1: datos a introducir por el usuario.	51
Figura 26. Ejemplo 1: resultados de las condiciones de carga.	52
Figura 27. Ejemplo 1: resultados de otros datos característicos del grupo.	52
Figura 28. Ejemplo 1: cálculo de la caída de tensión.	53
Figura 29. Ejemplo 2: datos a introducir por el usuario.	54
Figura 30. Ejemplo 2: resultados de las condiciones de carga.	54
Figura 31. Ejemplo 2: resultados de otros datos característicos del grupo.	55
Figura 32. Ejemplo 2: cálculo de la caída de tensión.	55
Figura 33. Diagrama de Gantt	56

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Grupos de conexión.	25
Tabla 2. Conexión de transformadores de los grupos C y D.	28
Tabla 3. Resultados de la valoración de las alternativas.	35
Tabla 4. Resultados de la valoración de las herramientas software.	38
Tabla 5. Partida presupuestaria de horas internas.	57
Tabla 6. Partida presupuestaria de horas internas.	57
Tabla 7. Partida presupuestaria de otros gastos.	57
Tabla 8. Resumen del presupuesto	57

1. INTRODUCCIÓN

Este documento contiene el desarrollo del Trabajo Fin de Grado (TFG) con el título *Diseño de una aplicación software para el cálculo del acoplamiento en paralelo de transformadores*. En primer lugar, en el Trabajo se explicarán aspectos tales como el contexto del mismo, los objetivos y el alcance del proyecto, y los beneficios que se esperan obtener con el desarrollo de la interfaz gráfica de usuario que se ha llevado a cabo en el proyecto.

A continuación, se tratará el Estado del Arte, donde se explicarán en mayor detalle los aspectos más importantes a conocer sobre el acoplamiento en paralelo de transformadores de potencia. En este apartado se mencionarán las condiciones que son necesarias o recomendables para el acoplamiento en paralelo, y se obtendrá razonadamente toda la formulación necesaria que se ha empleado para llevar a cabo correctamente el desarrollo del código de programación de la interfaz gráfica.

Posteriormente, en el apartado correspondiente al análisis de alternativas, se expondrán diferentes alternativas consideradas para el desarrollo de la interfaz gráfica, mencionando para cada una de ellas sus ventajas y sus desventajas, y se explicarán finalmente los motivos por los que se ha seleccionado Matlab como herramienta software para llevar a cabo el desarrollo de la aplicación.

En el apartado de la descripción de la solución, se detalla el funcionamiento de la interfaz gráfica, se explica su estructura y cómo ésta contribuye al objetivo del proyecto de obtener los parámetros y condiciones de carga de un grupo de transformadores acoplados en paralelo.

En el apartado de resultados se muestra el funcionamiento de la aplicación mediante dos ejemplos prácticos de aplicación, en los que se observará el comportamiento de cada uno de los transformadores mediante los parámetros y condiciones de carga de los transformadores.

El Trabajo también cuenta con un presupuesto en el que se incluye la inversión económica necesaria para el desarrollo de este proyecto, así como un diagrama de Gantt que permite conocer las fases en las que se ha llevado el proyecto y el tiempo dedicado a cada una de ellas.

Por último, se exponen las conclusiones obtenidas tras la realización del Trabajo, destacando los aspectos más importantes que se han observado durante el desarrollo del mismo.

2. CONTEXTO

Este Trabajo de Fin de Grado se ha realizado en la *Escuela de Ingeniería de Bilbao*, perteneciente a la *Universidad del País Vasco – Euskal Herriko Unibertsitatea* (UPV-EHU), dentro del Dpto. de Ingeniería Eléctrica. El Trabajo trata sobre el desarrollo de una aplicación software o interfaz gráfica de usuario que permita obtener y visualizar los parámetros y condiciones de carga de un grupo de transformadores eléctricos de potencia acoplados en paralelo.

2.1. El Sistema Eléctrico de Potencia

Se conoce como Sistema Eléctrico de Potencia (SEP) el conjunto de equipos e instalaciones que posibilitan el uso de la energía eléctrica a gran escala. Las cuatro partes fundamentales del SEP son la generación, el transporte, la distribución y el consumo. Si bien a cada una de las partes le corresponden distintos niveles de tensión, las cuatro operan a frecuencia constante (50 Hz en Europa y 60 Hz en América) y en conjunto constituyen un sistema trifásico de tensiones. [1]



Figura 1. Esquema del Sistema Eléctrico de Potencia (SEP). [2]

La generación se produce en las centrales eléctricas y su fin es producir energía eléctrica a gran escala a partir de otras formas de energía disponibles. Las centrales eléctricas de generación se clasifican según el tipo de fuente primaria de energía que utilizan; a saber, hidroeléctricas, térmicas, nucleares, eólicas, solares, etc. Las tres primeras son las más abundantes y constituyen los grandes centros de generación.

Las redes de transporte y distribución se encargan de transmitir la energía eléctrica generada hasta los consumidores finales. Habitualmente, el término *transporte* hace referencia a la transferencia de energía entre los centros de generación y los

principales núcleos de reparto de carga conocidos como subestaciones. Por su parte, el término *distribución* hace referencia al reparto de dicha energía dentro de un grupo de consumidores, mediante líneas de menor tensión. Es lo más habitual que el transporte se realice por líneas aéreas y posteriormente se utilicen líneas subterráneas para la distribución, una vez se entra en núcleos urbanos.

Finalmente, la energía generada es recibida en los diferentes centros de consumo. El consumo puede realizarse a diferentes niveles de tensión, dependiendo de las características de cada centro de consumo, de la potencia demandada y de los niveles de tensión presentes en la zona.

En consecuencia, para un correcto funcionamiento del SEP resulta necesario convertir diferentes formas de energía en energía eléctrica, transportar y distribuir esta energía hasta los consumidores finales. Todo ello debe, además, realizarse al nivel de tensión adecuado para cada etapa, por lo que entre cada etapa son necesarios elementos capaces de realizar las diferentes conversiones de energía. Los elementos responsables de ello son las máquinas eléctricas de corriente alterna. [1]

2.2. El transformador de potencia

El invento que aseguró la ubicuidad de la energía eléctrica es una máquina que no funciona mediante movimiento y es casi totalmente silenciosa. Ese invento es el transformador de potencia, un ingenioso instrumento desarrollado a finales del S.XIX. Es un componente esencial en los sistemas eléctricos de potencia modernos.

Se trata de una máquina eléctrica de corriente alterna que tiene como función la transmisión de potencia eléctrica variando las condiciones eléctricas de la misma, a saber, la tensión y la intensidad asociados a la potencia eléctrica transmitida, mientras que la frecuencia no varía. Puede convertir la electricidad de baja corriente y alto voltaje en alta corriente y bajo voltaje, y viceversa. [3]



Figura 2. Transformador de potencia.

Los elementos más importantes que forman un transformador de potencia son un núcleo magnético formado por chapa magnética apilada y dos devanados eléctricos. Se denomina devanado primario al devanado por el cual el transformador es alimentado, mientras que el secundario es el devanado por el cual se conecta la carga al transformador. Los devanados se arrollan sobre el núcleo magnético.

No existe conexión conductiva entre los circuitos eléctricos. Sólo los cambios en un circuito repercuten en el otro. Los circuitos generalmente se ven sometidos a corrientes o tensiones sinusoidales, y el efecto del transformador consiste en cambiar los niveles de voltaje o tensión, transfiriendo la potencia con pérdidas pequeñas. El campo magnético que une ambos circuitos eléctricos puede darse en el aire, pero se da por lo general en un material ferromagnético, el núcleo, donde el campo puede ser cientos de veces mayor que en el aire, lo que hace del transformador una máquina eficiente y de tamaño más reducido. El transformador es una máquina eléctrica en la cual los cambios del flujo magnético ocurren debido a variaciones en el tiempo de la corriente, en lugar de por movimiento. [4]

3. OBJETIVOS Y ALCANCE

El principal objetivo de este Trabajo es el desarrollo de una aplicación software o interfaz gráfica de usuario en el entorno de Matlab capaz de obtener los parámetros y condiciones de carga de un grupo de transformadores de potencia acoplados en paralelo.

Como complementarios al objetivo principal del proyecto, se llevarán a cabo también los siguientes apartados que constituyen en conjunto el alcance del proyecto:

- Análisis y estudio del funcionamiento en carga de un transformador de potencia.
- Análisis de la necesidad de que los transformadores de potencia operen dentro de los rangos de trabajo marcados por sus características nominales.
- Análisis y estudio de las características generales del acoplamiento en paralelo de los transformadores, así como de las condiciones necesarias y recomendables para el acoplamiento.
- Estudio del reparto de potencias en los transformadores acoplados en paralelo con la obtención teórica de las expresiones matemáticas necesarias para conocer las condiciones de carga de cada transformador.
- Programación del código de la aplicación en el software de programación *Matlab*, mediante el uso de la herramienta *GUIDE* disponible para el desarrollo de la aplicación software.
- Optimización de los recursos humanos, materiales y económicos a la hora de trabajar con un grupo de transformadores acoplados en paralelo.
- Conseguir una reducción de tiempos necesarios a la hora de conocer las características de un grupo de trabajo de transformadores que trabajan acoplados en paralelo.

Desde un punto de vista más personal, el Trabajo también tiene como objetivo, de cara a la formación como estudiante, adquirir un mayor nivel de conocimiento sobre el funcionamiento de los transformadores de potencia así como el objetivo de adquirir experiencia de manejo de un software de programación como es Matlab, útil en sectores muy diversos de la Ingeniería.

4. BENEFICIOS DEL PROYECTO

A continuación se presentan los beneficios a obtener mediante el desarrollo del Trabajo. Los beneficios se han clasificado en técnicos, económicos y sociales, siendo los primeros los más importantes, dado que se trata de un proyecto con carácter fundamentalmente técnico.

4.1. Beneficios técnicos

El acoplamiento en paralelo de los transformadores es necesario cuando se busca transmitir potencia eléctrica cuyo valor supera el valor nominal para el que está diseñado un único transformador, ya que así se evitan sobrecargas en la máquina que pueden no resultar deseables.

El creciente uso a lo largo de los últimos años de aplicaciones software de simulación ha supuesto numerosos beneficios técnicos en todo tipo de ámbitos dentro de la Ingeniería. Una aplicación software capaz de simular el comportamiento en carga de un grupo de transformadores resulta de gran utilidad desde el punto de vista técnico, ya que es posible conocer la situación de carga que presentará el grupo de transformadores sin necesidad de intervenir en ninguno de ellos. Esto es útil fundamentalmente para prever de antemano cualquier situación indeseable, como por ejemplo una situación de sobrecarga por encima de los valores nominales en alguno de los transformadores acoplados. Con ello es posible conseguir una mayor vida útil de cada uno de los transformadores, con la disminución de costes asociados a la parte técnica que conlleva.

4.2. Beneficios económicos

Ligado a los beneficios técnicos mencionados anteriormente, el disponer de una aplicación software de estas características ofrece beneficios económicos en términos de una reducción de la necesidad de recursos tanto humanos como materiales.

En primer lugar, se reduce de manera considerable el gasto en material gracias a la prevención de las situaciones de sobrecarga u otras situaciones que acaban resultando en daños o pérdida de calidad de funcionamiento de uno o varios transformadores. Los transformadores pueden verse seriamente perjudicados si trabajan fuera del rango fijado por las condiciones nominales de funcionamiento; por ello, el uso de la aplicación software para la prevención de estos casos tiene un impacto positivo claro en los gastos de mantenimiento que supone el disponer de un grupo de transformadores trabajando en paralelo.

Por otro lado, al reducirse la necesidad de intervenir en el sistema acoplado para labores de mantenimiento implica una menor necesidad de recursos humanos. Asimismo, una interfaz gráfica de usuario de fácil manejo o de uso intuitivo elimina la necesidad de que el usuario requiera de los conocimientos técnicos más detallados y profundos para poder calcular los parámetros de carga y/o conocer la situación de carga de los transformadores acoplados. Esto implica también una reducción de tiempos, ya que el software únicamente se ha de programar una vez y posteriormente puede utilizarse sin problemas.

4.3. Beneficios sociales

Por último, pueden mencionarse los beneficios que ofrece el desarrollo de una aplicación de estas características de cara a la sociedad.

Toda la sociedad es en mayor o menor medida consumidora de energía eléctrica y, como tal, demanda un suministro de energía de calidad, ininterrumpido y seguro. La red a la que se conectan los consumidores ha de trabajar a unos niveles de tensión y frecuencia concretos. Cualquier desequilibrio en la red ha de corregirse si no se quiere que los aparatos conectados dejen de funcionar correctamente. En el caso concreto del acoplamiento en paralelo de transformadores, un fallo en alguno de ellos puede implicar desequilibrios en la potencia transmitida en el resto de transformadores, lo cual a su vez puede provocar el fallo del resto de transformadores. Todo conllevaría la aparición de daños en la parte de consumo, aguas debajo de los transformadores, por lo que los consumidores se verían directamente perjudicados.

Los beneficios sociales se derivan directamente de los beneficios técnicos y económicos anteriormente mencionados; al fin y al cabo, el desarrollo de una herramienta de simulación de estas características supone una ventaja de cara a los fabricantes a la hora de diseñar los transformadores, ya que se conoce de antemano las condiciones en las que trabajarán. Esto conlleva de igual manera una mayor garantía del suministro de la energía eléctrica de calidad, de forma que se satisface con mayor seguridad la demanda de energía de todos los consumidores.

5. ESTADO DEL ARTE

A continuación se estudia el estado del arte de los transformadores de potencia y su acoplamiento en paralelo, con el fin de conocer con mayor profundidad el funcionamiento de los mismos, que resulta imprescindible para poder llevar a cabo un desarrollo y correcta programación de la interfaz gráfica de usuario. Este apartado comprende fundamentalmente el estudio de funcionamiento de los transformadores de potencia monofásicos y trifásicos, así como el estudio del funcionamiento del acoplamiento en paralelo de transformadores.

5.1. Transformador de potencia monofásico

Un transformador de potencia es una máquina eléctrica encargada de adaptar los niveles de tensión de las diferentes partes que componen el Sistema Eléctrico de Potencia.

El transformador está básicamente formado por un núcleo que constituye un circuito magnético y dos devanados: el devanado primario (por donde el transformador recibe la energía) y el devanado secundario (por donde se conecta la carga). El transformador puede alimentarse por cualquiera de los dos lados. Se denomina transformador elevador aquel en el cual la entrada está a menor tensión que la salida, es decir, aquel cuyo devanado primario se corresponde con el lado de alta tensión (AT); y transformador reductor aquel en el cual la salida está a mayor tensión que la entrada, es decir, aquel en el que el devanado primario se corresponde con el lado de baja tensión (BT). [1]

Además de los puramente estructurales, los elementos que constituyen un transformador de potencia se pueden clasificar en:

- **Partes activas:** las partes activas del transformador las componen el circuito magnético (constituido por el núcleo magnético, formado por chapa magnética apilada) y el circuito eléctrico (constituido por los conductores que forman los dos devanados). Son los elementos de mayor importancia del transformador ya que son los responsables tanto de la recepción como de la transmisión de la energía eléctrica.

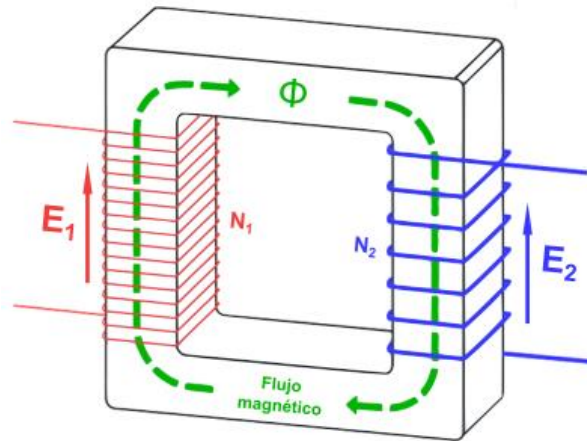


Figura 3. Partes activas de un transformador de potencia.

- Sistemas de entrada/salida: se denomina así a los sistemas que permiten conectar entre sí los devanados del transformador (circuito eléctrico) con las líneas eléctricas de entrada y salida. Está formado principalmente por los bornes de AT y BT. Los de AT están formados por aislantes de mayor altura y conductores de menor sección, mientras que los de BT están formados por aislantes más bajos y conductores de mayor sección.
- Sistema de refrigeración: el funcionamiento del transformador origina unas pérdidas que se transforman en calor que es necesario evacuar al exterior con el objetivo de mantener la temperatura estable dentro de los niveles adecuados. Esta evacuación se realiza mediante el refrigerante, que por lo general se trata de un aceite mineral, mediante la superficie del tanque o la cuba y, en algunos casos, mediante aletas de refrigeración y/o ventiladores.
- Sistemas de protección: son sistemas para proteger al refrigerante del contacto con agentes externos y para proteger al transformador de fallos en el refrigerante. También puede incluir sistemas de protección de tipo eléctrico como puestas a tierra, protección diferencial, etc.
- Sistemas de control: son los sistemas de sensores y actuadores empleados para tener información en todo momento del estado del transformador y hacer que funcione en las condiciones definidas.

5.1.1. Principio de funcionamiento

El transformador es una máquina eléctrica que sólo puede funcionar mediante corriente alterna. Al hacer circular una intensidad de corriente alterna por el devanado primario del transformador, se genera un flujo magnético alterno que circula por el

núcleo magnético del transformador. Dicho flujo depende de la tensión aplicada, del número de espiras y de la frecuencia. Este flujo que se canaliza por el núcleo se denomina flujo mutuo, y se vinculará de igual manera con el devanado secundario arrollado al núcleo. Ello inducirá una tensión alterna en dicho devanado, que dependerá de la magnitud del flujo, de la frecuencia y del número de espiras. Las variables tensión, flujo, frecuencia y número de espiras se relacionan en los transformadores de la siguiente manera:

$$E_1 = 4,44 \cdot N_1 \cdot \Phi_0 \cdot f$$

$$E_2 = 4,44 \cdot N_2 \cdot \Phi_0 \cdot f$$

siendo:

E = tensión en los devanados (E_1 primario y E_2 secundario).

N = número de espiras de los devanados (N_1 primario y N_2 secundario).

Φ_0 = flujo magnético mutuo.

f = frecuencia de la tensión alterna.

Se observa que es posible conseguir los niveles adecuados de tensión a la entrada y salida del transformador si se dispone del número de espiras adecuado para ello. Variar el número de espiras es en principio la manera más sencilla de modificar la relación entre las tensiones de entrada y salida de un transformador.

Es destacable mencionar que, para un transformador real no ideal, no todo el flujo magnético se va a canalizar por el núcleo del transformador; existe siempre un denominado flujo de fugas, que atraviesa un devanado sin pasar al otro, ya que no se canaliza por el núcleo. Si bien el flujo de fugas es considerablemente menor que el flujo mutuo, no se puede despreciar en todas las ocasiones, ya que cumple un papel fundamental a la hora de estudiar las pérdidas del transformador.

Asimismo, también es recomendable destacar que la notación utilizada podrá diferir ligeramente dependiendo de si se quieren considerar las pérdidas del transformador o si el transformador se halla o no conectado a una carga.

5.2. Transformador monofásico real en carga

En el apartado anterior se ha realizado el estudio de un transformador ideal en el que los arrollamientos no tenían resistencia ni flujos de dispersión. Cuando se habla de transformador real, hace referencia a que se tienen en cuenta estos efectos de pérdidas debidas a las resistencias internas de los devanados, la existencia del flujo de fugas en los devanados o el llamado efecto de histéresis, que se produce debido a la

saturación del núcleo magnético: a su pérdida de capacidad de canalizar el flujo de forma lineal cuando se alcanzan altos valores de éste. [5]

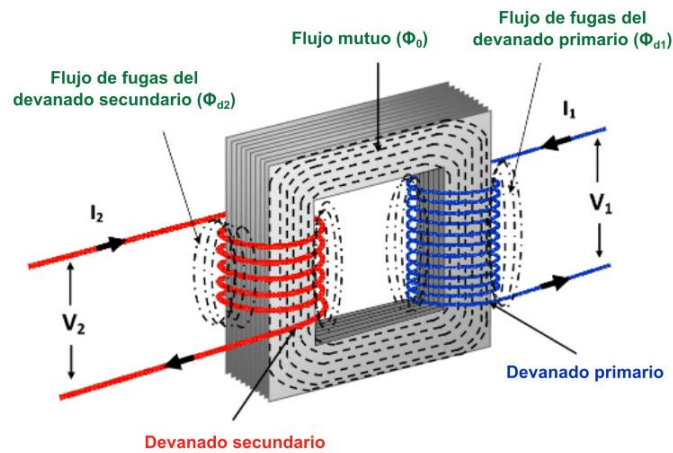


Figura 4. Visualización de los flujos de fugas en los devanados.

Se dice que un transformador de potencia monofásico está conectado en carga cuando, estando alimentado por su devanado primario, tiene en su devanado secundario una carga conectada.

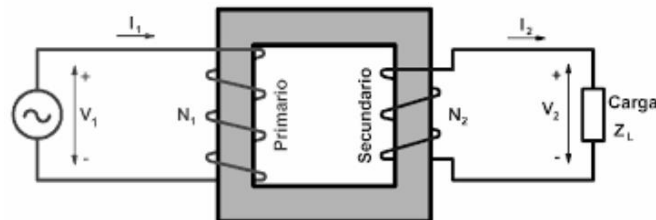


Figura 5. Esquema de un transformador conectado a carga.

Como consecuencia de considerar la resistencia y reactancia internas del devanado primario, se da una caída de tensión en los conductores, por lo que la tensión aplicada difiere de la tensión inducida en las espiras del devanado ($V_1 \neq E_1$). La tensión inducida E_1 es la que genera el flujo que atraviesa el devanado primario, que tendrá una componente de flujo mutuo y otra correspondiente al flujo de fugas por el devanado primario, y a su vez, el flujo mutuo inducirá una tensión E_2 en el devanado secundario. Como consecuencia, esta tensión generará un flujo de dispersión en dicho devanado.

$$\Phi_1 = \Phi_0 + \Phi_{d1}$$

$$\Phi_2 = \Phi_0 + \Phi_{d2}$$

Al mismo tiempo, dado que tampoco se desprecian la resistencia y reactancia internas del devanado secundario, si el transformador está conectado en carga se dará una caída de tensión entre la tensión inducida en el secundario E_2 y la tensión en bornes de la carga V_2 ($E_2 \neq V_2$):

$$\underline{V}_1 = \underline{E}_1 + (R_1 + jX_1) \cdot \underline{I}_1$$

$$\underline{E}_2 = \underline{V}_2 + (R_2 + jX_2) \cdot \underline{I}_2$$

Si bien existen estas caídas de tensión debidas a la resistencia interna de ambos devanados, en la práctica son considerablemente pequeñas, por lo que se pueden aplicar las siguientes aproximaciones:

$$V_1 \approx E_1 = 4,44 \cdot N_1 \cdot \Phi_0 \cdot f$$

$$V_2 \approx E_2 = 4,44 \cdot N_2 \cdot \Phi_0 \cdot f$$

En este caso, por nomenclatura, se han denominado E_1 y E_2 a las tensiones inducidas debidas únicamente al flujo mutuo. Se denomina *relación de transformación* (a) a la relación entre las tensiones del primario y del secundario transformador. Para un transformador en carga, aplicando las expresiones anteriores al cálculo de la relación de transformación, se obtiene:

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

Por otra parte, el circuito magnético cumple la *Ley de Hopkinson*:

$$N_1 \cdot \underline{I}_1 - N_2 \cdot \underline{I}_2 = \underline{\Phi}_0 \cdot \mathfrak{R} = N_1 \cdot \underline{I}_{10}$$

siendo:

\mathfrak{R} = reluctancia del circuito magnético.

\underline{I}_{10} = intensidad de vacío.

Dado que la intensidad de vacío es habitualmente despreciable frente a la corriente de carga ($I_{10} \ll I_1$) se puede considerar que $N_1 \cdot \underline{I}_1 = N_2 \cdot \underline{I}_2$, por lo que la relación de intensidades del primario y secundario resulta ser la inversa de la relación de transformación:

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{N_2}{N_1} = \frac{1}{N_1/N_2} = \frac{1}{a}$$

5.3. Reducción de valores de secundario a primario

Para poder modelizar el comportamiento de un transformador real en carga mediante un único circuito eléctrico, es necesario llevar a cabo una transformación de los valores de las tensiones, intensidades e impedancias de uno de los lados del transformador. La necesidad de realiza tal transformación es debida a que en realidad no existe continuidad eléctrica entre el circuito primario y el circuito secundario. [1]

Como ya se ha visto en el apartado anterior, las relaciones entre tensiones e intensidades del primario y secundario son las siguientes:

$$\frac{V_1}{V_2} \approx \frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2} = a$$
$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{1}{a}$$

A partir de estas relaciones se pueden obtener la relación entre impedancias (o resistencias o reactancias) del primario y secundario:

$$Z_{prim} = \frac{V_{prim}}{I_{prim}} = \frac{V_{sec} \cdot a}{I_{sec}/a} = \frac{V_{sec}}{I_{sec}} \cdot a^2 = Z_{sec} \cdot a^2 = Z'_{sec}$$

De estas relaciones se deduce lo siguiente:

- Las tensiones del secundario se refieren a primario multiplicándolas por la relación de transformación: $V'_2 = V_2 \cdot a$
- Las intensidades del secundario se refieren a primario dividiéndolas por la relación de transformación: $I'_2 = I_2/a$
- Las impedancias del secundario se refieren al primario multiplicándolas por el cuadrado de la relación de transformación: $Z'_{sec} = Z_{sec} \cdot a^2$

5.4. Circuito equivalente del transformador

Se suele recurrir a la sustitución del transformador por un circuito equivalente simplificado que incorpore todos los fenómenos físicos que tienen lugar en el transformador real. El desarrollo de circuitos equivalentes de las máquinas eléctricas está ligado a la propia evolución y expansión de la ingeniería eléctrica, no siendo una invención moderna. [5]

Para representar el circuito equivalente de un transformador, es necesario tener en cuenta las reducciones de los valores de secundario a primario que se han

mencionado en el apartado anterior, con el objetivo de poder establecer una conexión eléctrica entre el circuito del primario y del secundario, formando así un único circuito:

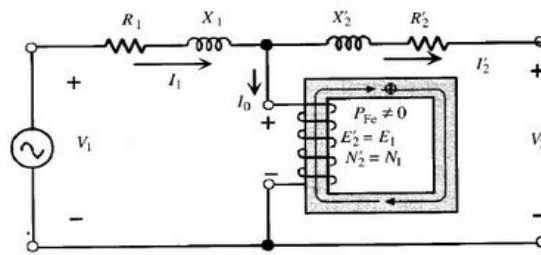


Figura 6. Circuito equivalente del transformador. [5]

Como se observa en la Figura 6, en el circuito se tiene la conexión eléctrica entre primario y secundario en los puntos $A = a$ y $B = b$. También está representada la rama de vacío, que se caracteriza por una conductancia G_0 y una susceptancia B_0 . El circuito equivalente del transformador puede verse simplificado si se tienen en consideración algunas características como las siguientes:

- Dado que $I_{10} \ll I_1$, se acepta que $I_1 \approx I_2$.
- Dado que la caída de tensión en el primario es pequeña, se acepta que $V_1 \approx E_1$.
- Habiendo aplicado las dos simplificaciones anteriores, las resistencias y reactancias se pueden agrupar de la siguiente manera formando las resistencia y reactancia equivalentes:

$$R_e = R_1 + R_2'$$

$$X_e = X_1 + X_2'$$

De esta manera, el circuito equivalente del transformador puede representarse de la siguiente forma habiendo aplicado estas simplificaciones:

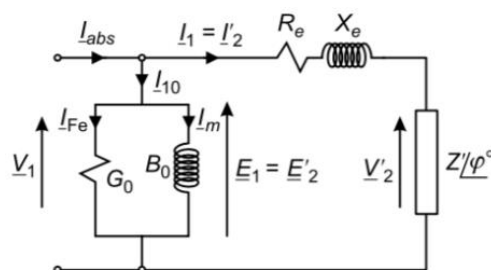


Figura 7. Circuito equivalente simplificado del transformador.

5.5. Valores nominales del transformador

Los valores nominales del transformador son valores de diseño. Los transformadores no pueden mantener un correcto funcionamiento a cualquier nivel de tensiones o intensidades, ya que están diseñados para poder soportar unas determinadas condiciones límite. Aquellas condiciones para las cuales un transformador puede funcionar correctamente por un tiempo teóricamente infinito se denominan condiciones nominales. Estas condiciones se representan en los transformadores de potencia mediante unos valores nominales de tensión, intensidad y potencia. Los valores nominales del transformador vienen especificados en la placa de características del transformador.

- Tensión nominal, V_N : aquella tensión que el transformador puede soportar indefinidamente. Viene fijada por los aislantes eléctricos que lleva el transformador así como por el criterio de impedir que el transformador entre en saturación.
- Intensidad nominal, I_N : aquella intensidad que circula por los devanados que puede ser soportada por los bobinados del transformador de forma indefinida. Viene fijada por la sección de los conductores, siendo un valor diferente para el bobinado primario y para el bobinado secundario.

Debido a que no tendría sentido construir un transformador que soporte condiciones nominales en primario y secundario que no fuesen equivalentes, tenemos que:

$$\frac{V_{1N}}{V_{2N}} = \frac{I_{2N}}{I_{1N}} = a$$

La potencia nominal del transformador es aquella que puede transmitir el transformador sin superar los límites nominales de tensión o intensidad nominales, y es un valor único para ambos lados del transformador:

$$S_N = V_{1N} \cdot I_{1N} = V_{2N} \cdot I_{2N}$$

5.6. Fundamentos de transformadores trifásicos

La transformación de tensiones y corrientes en los sistemas trifásicos puede realizarse de dos maneras distintas. La primera consiste en emplear un transformador monofásico en cada una de las tres fases, formando circuitos magnéticos independientes. La segunda manera, en cambio, consiste en emplear un solo núcleo

magnético en el que se incorporan todos los devanados; en este caso, el sistema está formado por tres columnas iguales sobre las que se arrollan las espiras. [5]

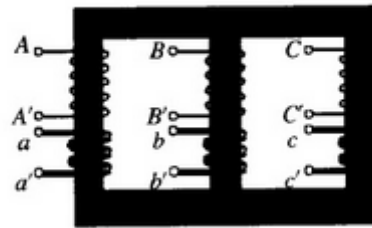


Figura 8. Circuito magnético de un transformador trifásico.

La solución trifásica es la más económica ya que se requiere de menos material ferromagnético así como menor necesidad de bornas de material aislante, si bien tiene como desventaja que sería más caro disponer de una unidad de repuesto.

5.6.1. Tipos de conexiones

Se pueden realizar en primario y en secundario tres tipos de conexiones: en estrella, triángulo o zigzag.

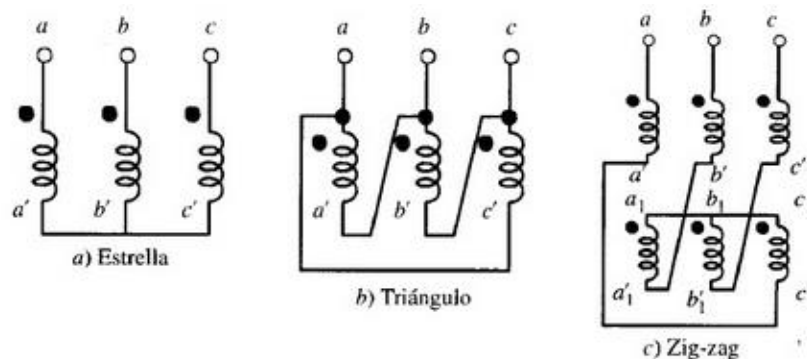


Figura 9. Tipos de conexiones en transformadores trifásicos. [5]

5.6.2. Grupos de conexión

En un transformador monofásico, despreciando la pequeña caída de tensión interna, la tensión en primario y en secundario están en fase. Por el contrario, en un transformador trifásico, la tensión en el secundario aparece girada un ángulo α respecto a la del primario, dependiendo del tipo de conexión (estrella, triángulo o zigzag) que se haya empleado en los bobinados del transformador. El valor del ángulo α tiene siempre un valor múltiplo de 30° . [1]

Se denomina índice horario (IH) de un transformador trifásico al desfase existente entre las tensiones compuestas del primario y del secundario dividido por 30° :

$$IH = \frac{\text{giro horario experimentado}}{30^\circ} = \frac{\alpha}{30^\circ}$$

Dado que α siempre toma un valor múltiplo de 30° , el índice horario toma 12 posibles valores (enteros de 0 a 11). Aquellos índices horarios que difieren en 4 unidades son equivalentes debido a que si se asignan los bornes del secundario de forma correcta, todos conducen al mismo sistema trifásico de tensiones.

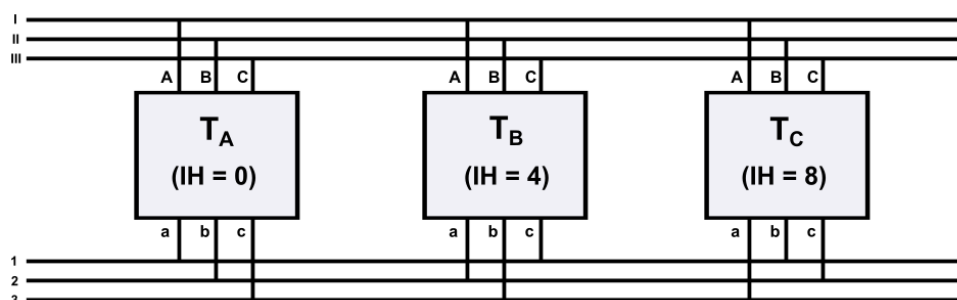


Figura 10. Índices horarios equivalentes.

Se denomina grupo de conexión a cada uno de los conjuntos que agrupan índices horarios equivalentes (aquellos que difieren en 4 unidades):

Grupo	Índices horarios		
	Grupo A	0	4
Grupo B	6	10	2
Grupo C	5	9	1
Grupo D	11	3	7

Tabla 1. Grupos de conexión.

5.7. Acoplamiento en paralelo de transformadores

El acoplamiento en paralelo de transformadores se emplea, como ya se ha mencionado anteriormente, con el objetivo de aumentar la potencia transmitida, por lo general cuando un solo transformador no es capaz por sí solo de proceder al suministro de toda la potencia demandada por la carga sin ver superados sus valores nominales de funcionamiento. Se pueden acoplar en paralelo tanto transformadores monofásicos como trifásicos, si bien lo habitual para la transformación de la energía entre las

diferentes etapas del Sistema Eléctrico de Potencia es el acoplamiento en paralelo de transformadores trifásicos.

Generalmente, el acoplamiento en paralelo de transformadores ofrece una serie de ventajas frente a utilizar un transformador de mayor potencia nominal. Estas ventajas incluyen una mayor fiabilidad, una mayor eficiencia, posibilidad de expandir la potencia de salida y mayor facilidad de cara a labores de mantenimiento. [6]

5.7.1. Condiciones para el acoplamiento de transformadores monofásicos

Para el acoplamiento en paralelo de un grupo de transformadores monofásicos, las características de los transformadores deben cumplirse una serie de condiciones estrictamente necesarias y, además, hay otra serie de condiciones que, aun no siendo imprescindibles, su verificación es recomendable para el acoplamiento.

Condiciones necesarias para el acoplamiento:

- La relación de transformación debe ser idéntica en todos los transformadores a acoplar.
- Los transformadores acoplados deben estar conectados con la polaridad correcta.

Condiciones recomendables para el acoplamiento:

- Se recomienda que las tensiones de cortocircuito u_z sean iguales. Si se cumple esta condición, se consigue que todos los transformadores acoplados trabajen con el mismo índice de carga.
- Es recomendable que la relación u_R/u_X sea la misma en todos los transformadores acoplados, consiguiendo así que las intensidades suministradas por los siguientes transformadores estén en fase.

5.7.2. Condiciones para el acoplamiento de transformadores trifásicos

Asimismo, para realizar un correcto acoplamiento en paralelo de transformadores trifásicos, es imprescindible que se verifiquen las siguientes condiciones:

- Todos los transformadores deben proporcionar el mismo desfase entre las tensiones compuestas del primario y del secundario. Esto es posible conseguirlo de tres maneras diferentes:
 - Que los transformadores posean el mismo índice horario.
 - Que los transformadores sean del mismo grupo de conexión.

- Que los transformadores sean de los grupos C y D.
- Los transformadores deben de estar acoplados con la polaridad correcta.
- La relación de transformación de tensiones compuestas debe coincidir en todos los transformadores.

Asimismo, al igual que para el acoplamiento en paralelo de transformadores monofásicos, es recomendable aunque no imprescindible que se verifiquen las siguientes condiciones:

- Es recomendable que las tensiones de cortocircuito u_z sean iguales en todos los transformadores.
- Es recomendable que la relación u_R/u_X sea la misma en todos los transformadores.

Para acoplar en paralelo transformadores de igual índice horario, basta con que ambos se conecten de igual forma tanto en el primario como en el secundario. En la Figura 11 se muestra un ejemplo de las conexiones de acoplamiento de dos transformadores trifásicos de igual índice horario:

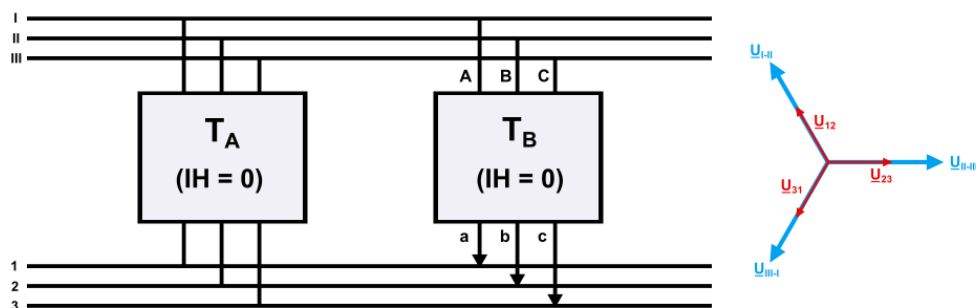


Figura 11. Acoplamiento de transformadores del mismo índice horario.

Si se quiere acoplar en paralelo transformadores de distintos índices horarios, pero todos ellos pertenecientes al mismo grupo de conexión, se debe de cambiar la conexión de los bornes del secundario dependiendo del índice de cada transformador. Un ejemplo se muestra en la Figura 10.

Si los transformadores que se desea acoplar en paralelo no son ni del mismo índice horario ni pertenecen tampoco al mismo grupo de conexión, la única posibilidad es acoplar transformadores cuyos índices horarios difieran en un equivalente de 180°.

Esto únicamente es posible si se acoplan transformadores de los grupos A y B o bien de los grupos C y D.

Acoplar los grupos A y B requiere de cambios internos complejos, por lo que no se van a considerar. Para los grupos C y D es necesario llevar a cabo un cambio en las conexiones externas, tanto del primario como del secundario del segundo transformador. En la Tabla 2 se muestra la manera de acoplar transformadores pertenecientes a los grupos C y D:

Grupo de conexión resultante D			
	Primario I, II, III	Secundario 1, 2, 3	
Grupo D	A B C	a b c	Grupo C
Grupo C	A C B	c b a	Grupo D
Grupo C	C B A	b a c	Grupo D
Grupo C	B A C	a c b	Grupo D
Grupo de conexión resultante C			

Tabla 2. Conexión de transformadores de los grupos C y D.

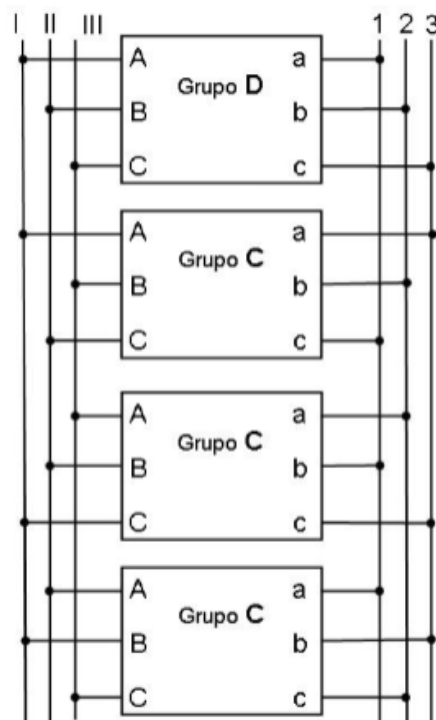


Figura 12. Conexión de transformadores de grupos C y D. Grupo resultante D.

5.7.3. Reparto de potencias en el acoplamiento de transformadores

En este apartado se analiza el reparto de potencia entre transformadores acoplados en paralelo. Dicho análisis se lleva a cabo para el caso de dos transformadores, utilizando los circuitos eléctricos equivalentes simplificados de cada uno:

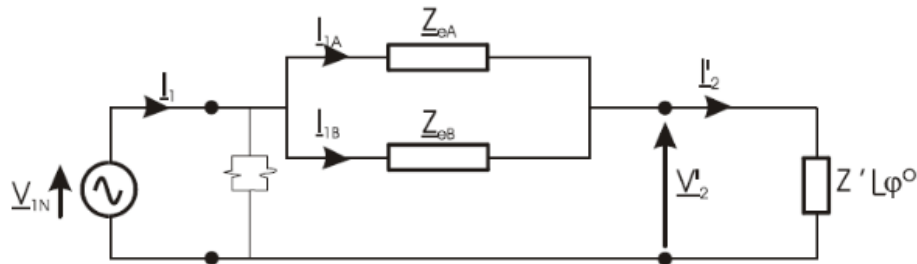


Figura 13. Circuito equivalente de dos transformadores en paralelo.

Partiendo de la situación de que hay dos transformadores, se cumple que:

$$I_1 = I_{1A} + I_{1B}$$

$$I_{1A} \cdot Z_{eA} = I_{1B} \cdot Z_{eB} \rightarrow I_{1A} \cdot Z_{eA} = I_{1B} \cdot Z_{eB} \rightarrow i_A \cdot I_{1NA} \cdot Z_{eA} \cdot 100 = i_B \cdot I_{1NB} \cdot Z_{eB} \cdot 100$$

de lo que se deduce, dividiendo por la tensión nominal del primario, que:

$$i_A \cdot u_{ZA} = i_B \cdot u_{ZB}$$

es decir, que si se cumple la condición de que $u_{ZA} = u_{ZB}$, se cumple que los índices de carga de ambos transformadores son iguales, por lo que estarán ambos igual de cargados, lo que implica que ambos alcanzarán al mismo tiempo la intensidad nominal o la situación de sobrecarga. Por el contrario, si $u_{ZA} \neq u_{ZB}$, los transformadores estarán cargados de forma desigual.

Por otro lado, se puede demostrar que si las impedancias equivalentes de todos los transformadores tienen ángulos iguales ($\varphi_{eA} = \varphi_{eB}$), o lo que es lo mismo, si la relación u_R/u_X es la misma, las intensidades I_{1A} e I_{1B} estarán en fase, por lo que se pueden sumar de forma escalar. Al cumplirse esto, las potencias aparentes también se pueden sumar directamente en módulos, obteniendo que la potencia del grupo es:

$$S_G = S_A + S_B$$

Por tanto, la potencia nominal del grupo será:

$$S_{NG} = S_{NA} + S_{NB}$$

En el caso de que las impedancias equivalentes tengan el mismo ángulo pero distintas tensiones de cortocircuito, se puede obtener la tensión de cortocircuito (u_{ZG}) del grupo de la siguiente forma:

la tensión de cortocircuito (u_Z) viene definida de la siguiente forma:

$$u_Z = \frac{I_{1N} \cdot Z_e}{V_{1N}} \cdot 100 (\%)$$

si se despeja la impedancia equivalente, la expresión queda de la siguiente manera:

$$Z_e = \frac{u_Z \cdot V_{1N}}{100 \cdot I_{1N}} = \frac{u_Z \cdot V_{1N}^2}{100 \cdot S_N}$$

teniendo en cuenta que los transformadores están acoplados en paralelo, las impedancias equivalentes de cada uno también están conectadas en paralelo, por lo que la impedancia total del grupo cumple la siguiente expresión:

$$\frac{1}{Z_{eG}} = \frac{1}{Z_{eA}} + \frac{1}{Z_{eB}}$$

que sustituyendo la impedancia por la expresión anterior, nos queda que:

$$\frac{S_{NG}}{u_{ZG}} = \frac{S_{NA}}{u_{ZA}} + \frac{S_{NB}}{u_{ZB}}$$

de donde se puede despejar finalmente la tensión de cortocircuito del grupo, que tiene la siguiente expresión:

$$u_{ZG} = \frac{S_{NG}}{\frac{S_{NA}}{u_{ZA}} + \frac{S_{NB}}{u_{ZB}}}$$

Además, la potencia transmitida por cada transformador puede expresarse de la siguiente manera:

$$S_i = S_G \cdot \frac{Z_{eG}}{Z_{ei}}$$

que sustituyendo las impedancias por su expresión anterior, queda:

$$S_i = \frac{S_G \cdot S_{Ni}}{S_{NG} \cdot u_{Zi}} \cdot u_{ZG}$$

6. ANÁLISIS DE ALTERNATIVAS

6.1. Técnicas de carácter correctivo, preventivo y predictivo

En este apartado se mencionan diferentes técnicas de actuación que tienen como objetivo asegurar el correcto funcionamiento de un grupo de transformadores acoplados en paralelo, evitando que aparezcan posibles daños en transformadores, fundamentalmente debidos a la situación de sobrecarga a la que pueden verse sometidos.

6.1.1. Técnicas de carácter correctivo

Estas técnicas denominadas de carácter correctivo llevan ese nombre debido a que se llevan a cabo una vez se ha detectado el fallo, y no antes. Esto constituye una desventaja en este tipo de técnica, ya que el fallo se ha de producir. Se trata de actuar una vez existe el fallo y habiéndose dejado que se produzca, permitiendo así un análisis de los efectos, las consecuencias o la gravedad que supone el hecho de que se produzca el fallo en la máquina o en la instalación.

En el caso de que un transformador entre en sobrecarga y se desee emplear una técnica de carácter correctivo para tratar el fallo, en primer lugar se debe de detectar la ubicación del fallo (en qué transformador ha tenido lugar) tratando de determinar las causas del mismo; después, detectar aquellos elementos que se hayan visto perjudicados debido al fallo y, finalmente, reparar o sustituir aquellos elementos cuyo funcionamiento se haya visto perjudicado de manera considerable.

6.1.2. Técnicas de carácter preventivo

Una técnica de carácter preventivo consiste en tratar de evitar que se llegue a producir el fallo, o bien tratar de posponerla en el tiempo en la medida en que sea posible. Esta técnica presenta como desventaja principal el hecho de que la vida útil de la máquina o de sus elementos no se optimiza de la manera más útil, ya que se sustituyen los elementos antes de que el fallo se produzca.

La sobrecarga en un grupo de transformadores en paralelo se da cuando aumenta la demanda de energía hasta el punto de que alguno de los transformadores supere los límites nominales de potencia de su funcionamiento. Para el caso del acoplamiento en paralelo de transformadores, tiene más sentido emplear técnicas de carácter predictivo como se mencionará en el siguiente apartado, que técnicas de carácter preventivo, ya que el fallo se da o bien debido a características ajenas a los elementos del transformador como el aumento de la carga o bien está determinado por

características y parámetros del transformador difícilmente modificables. Se podrían aplicar técnicas de carácter preventivo a la red o a la instalación mientras al transformador se le aplican técnicas predictivas.

6.1.3. Técnicas de carácter predictivo

Este tipo de técnicas, tal y como indica su nombre, se basan en predecir que determinado fallo puede ocurrir y cuándo lo hará, así como en determinar las consecuencias y efectos no deseados que tendría el fallo de llegar a producirse. Existen diversos mecanismos para llevar a cabo técnicas de tratamiento predictivo, tales como la simulación software o ensayos y pruebas con los transformadores antes de ponerlos en funcionamiento, con el fin de detectar de antemano los fallos que puedan surgir y estudiar la gravedad de las consecuencias que ello conllevaría. Una vez se han detectado aquellas causas que producirían el fallo, se actúa sobre ellas poniendo los medios necesarios para eliminarlas o para reducir al mínimo su impacto sobre el funcionamiento de la máquina. Las técnicas de carácter predictivo eliminan la desventaja que suponían las de carácter preventivo, ya que se consigue un mayor aprovechamiento de la vida útil de cada transformador.

En el presente Trabajo se ofrece una solución que puede considerarse como una técnica de carácter preventivo. El Trabajo presenta una simulación software mediante una interfaz gráfica de fácil manejo, mediante la cual se introducen datos característicos de los transformadores que forman el grupo acoplado en paralelo así como los datos de la red, y la herramienta software calcula las condiciones de carga del grupo de transformadores, ofreciendo así información sobre el estado de carga que tendría cada uno de manera anticipada. La herramienta software desarrollada también puede utilizarse con fines de diseño de transformadores, ya que permite variar los parámetros de los transformadores para conseguir que todos ellos trabajen en los rangos de valores adecuados, sin sobrecargas.

6.2. Análisis de alternativas para el estudio del acoplamiento en paralelo

El principal objetivo del presente Trabajo es, como ya se ha mencionado anteriormente, el desarrollo de una interfaz gráfica de usuario que permita dar a conocer las condiciones de carga de un grupo de transformadores acoplados en paralelo, partiendo de datos característicos de la red y de los transformadores implicados introducidos por el usuario.

A continuación se van a discutir los motivos por los que se ha considerado que tiene mayores ventajas el disponer de una herramienta software de estas características frente a otras posibilidades como llevar a cabo mediciones en el grupo de transformadores o modelos físicos a escala.

6.2.1. Ensayos en los transformadores

Se trata de tomar medidas directamente en los transformadores. Consiste en provocar que los transformadores entren en la situación límite de sobrecarga aumentando el índice de carga y se toman las medidas necesarias con objeto de conocer los parámetros de tensión e intensidad en el instante en el que los transformadores entran en sobrecarga. Este proceso es el que más se ajusta a la realidad, si bien no es deseable ya que puede someter a los transformadores al riesgo de entrar en situaciones de sobrecarga indeseadas que perjudiquen su funcionamiento.

6.2.2. Modelos físicos a escala

Otra posibilidad es emplear modelos físicos a escala. Se realizan las pruebas pertinentes sobre un prototipo. Un proceso de estas características no se lleva a cabo directamente en los transformadores que realmente irán acoplados en paralelo, lo que supone una desventaja también en términos económicos debido a la necesidad de producir el modelo a escala; sin embargo, aplicando las relaciones apropiadas de semejanza, pueden obtenerse resultados considerablemente fiables.

6.2.3. Simulación software

La simulación mediante herramientas software consiste en diseñar un modelo del grupo de transformadores acoplados en paralelo mediante la programación de los diferentes aspectos teóricos del comportamiento de los transformadores. A diferencia de las otras opciones mencionadas, la simulación software no realiza ningún tipo de prueba sobre un entorno real. Una vez programado el modelo en el simulador, el programa devuelve los datos de las condiciones de carga de cada uno de los transformadores implicados así como otros datos característicos del grupo, a partir de datos sobre la red y los transformadores que el usuario ha introducido.

De entre todas las opciones que se han citado, es la que menor inversión económica requiere debido a que no trabaja en un entorno real, y los resultados que se obtienen, si bien pueden en la teoría diferir de la realidad, son bastante fiables y no se alejan de forma significativa de la realidad.

6.2.4. Criterios de selección

A continuación se presentan los criterios de selección a los que se ha recurrido con la intención de comparar y finalmente de escoger entre las alternativas planteadas anteriormente:

- **Precisión y fiabilidad de los resultados:** los resultados obtenidos han de ser lo más fiables y precisos posible, con la finalidad de realizar un correcto análisis del acoplamiento en paralelo de los transformadores.
- **Cantidad de resultados:** cuanto mayor sea el número de datos de los que se pueda disponer, más profundo y detallado será el estudio y el análisis que pueda hacerse de los datos obtenidos, lo que permitirá una mejor caracterización del funcionamiento de los transformadores.
- **Costes económicos:** es importante que la alternativa elegida sea lo más económica posible, para evitar grandes gastos en el análisis del acoplamiento en paralelo de los transformadores.
- **Recursos humanos y materiales:** es esencial que no se empleen más recursos de los que sean estrictamente indispensables para el estudio del acoplamiento en paralelo.

6.2.5. Resultados del análisis

Con el propósito de escoger la mejor alternativa, se va a analizar en qué grado cumple cada alternativa mencionada cada criterio de selección y qué criterio es más importante que otro. Esto se realiza otorgando a cada criterio una ponderación o peso y asignando para cada alternativa planteada una puntuación a cada criterio que satisfaga en mayor o menor grado.

La ponderación se ha llevado a cabo mediante la asignación de un porcentaje de peso a cada criterio de selección, dando una suma total del 100 %, mientras que la puntuación se ha efectuado otorgando un valor de 1 a 5 para cada criterio que satisface cada alternativa, siendo 1 el menor nivel de satisfacción y 5 el mayor. La puntuación final de cada alternativa se ha calculado sumando todas las puntuaciones que se conceden a cada criterio multiplicadas por la ponderación de cada uno de ellos, quedando una puntuación total de entre 1 y 5 puntos para cada alternativa planteada.

En la siguiente Tabla 3 se recogen los resultados que se han obtenido siguiendo este método:

	Ponderación	ALTERNATIVAS		
		Ensayos	Modelos a escala	Simulación software
Fiabilidad y precisión de los resultados	20%	5	5	4
Cantidad de datos	10%	3	3	5
Costes económicos	40%	1	3	5
Recursos humanos y materiales	30%	2	3	5
TOTAL	100%	2,3	3,4	4,8

Tabla 3. Resultados de la valoración de las alternativas.

Tras observar los resultados, queda claro que la alternativa de la simulación mediante herramienta software es la opción más adecuada para el análisis y estudio del acoplamiento en paralelo.

Como ya se ha mencionado en numerosas ocasiones, el objetivo del presente Trabajo de Fin de Grado es justamente el diseño de una aplicación software para el cálculo de los parámetros y características de carga en el acoplamiento en paralelo de transformadores, habiendo introducido previamente los datos característicos de la red y de los transformadores. Tal y como se observa en la Tabla 3, la opción de la herramienta software es la más económica, la que menos recursos requiere y la que en principio mayor cantidad de datos puede aportar, ya que el programa puede diseñarse en función de las necesidades de datos que se deseen obtener, por lo que es una opción en ese sentido bastante flexible. El único punto donde la opción de la simulación software no ha obtenido la mayor puntuación de todas es en la fiabilidad y precisión de los resultados, ya que mediante los ensayos o los modelos a escala se obtienen mejores resultados al trabajar directamente sobre un transformador real.

Una vez queda claro que la alternativa a emplear es la simulación software, queda por seleccionar la herramienta software que va a utilizarse para ello.

6.3. Selección de la herramienta software

En este apartado se discuten diferentes propuestas de posibles herramientas software que pueden utilizarse para el desarrollo de un programa que pueda llevar a cabo la simulación deseada. Al igual que en el apartado anterior, se han comparado todas las propuestas y finalmente se ha escogido la que se ha considerado más adecuada para el propósito del proyecto en base a unos criterios de selección.

A continuación se presentan distintas herramientas con las que se puede llevar a cabo la simulación del cálculo del acoplamiento en paralelo de transformadores:

6.3.1. PSCAD / EMTDC

El software PSCAD / EMTDC es una herramienta de simulación para modelizar y estudiar sistemas eléctricos. La simplicidad de uso es una de sus características más importantes. El módulo EMTDC es el simulador de sistemas eléctricos y el PSCAD es utilizado para la realización de la interfaz gráfica de usuario. Si bien el programa fue desarrollado en un principio para el estudio de fenómenos electromagnéticos en corriente continua, hoy en día se puede utilizar para una amplia gama de estudios de simulación. [7]

6.3.2. Visual Basic

Visual Basic es un lenguaje de programación de Microsoft relativamente sencillo de aprender y utilizar. Facilita el desarrollo de aplicaciones o de interfaces gráficas de usuario. El usuario puede crear una aplicación utilizando los componentes que proporciona el programa mismo. Es especialmente útil para trabajar con bases de datos.

6.3.3. Mathcad

Mathcad es una herramienta software que tiene incorporadas todas las funcionalidades de las hojas de cálculo, así como una extensa librería de funciones, lo que le otorga una gran potencia, y resulta de gran utilidad para amplios sectores de la Ingeniería, ya que dispone de una alta compatibilidad con muchas de las herramientas más utilizadas en Ingeniería. [7]

6.3.4. Matlab – GUIDE

Matlab (Matrix Laboratory) es un software interactivo, que combina el cálculo numérico con representaciones gráficas. De esta manera integra el análisis numérico, el cálculo matricial y el procesamiento de señales mediante gráficos que facilitan el análisis de datos. Matlab lleva incorporada la herramienta GUIDE (Graphical User Interface Development Environment), que posibilita el diseño de interfaces gráficas de usuario o aplicaciones de uso y manejo intuitivo mediante botones, texto, menús, gráficos, etc. [8]

6.3.5. Criterios de selección

Con el objetivo de seleccionar una de las herramientas software planteadas para el diseño de la interfaz gráfica, se han establecido los siguientes criterios de selección:

- **Sencillez de manejo:** se ha valorado si la herramienta es fácil e intuitiva de manejar para el diseño de interfaces gráficas.
- **Flexibilidad:** es importante que la herramienta sea flexible y no suponga grandes complicaciones de alteración de la aplicación ante posibles cambios que puedan realizarse en el diseño de la interfaz de forma puntual.
- **Posibilidad de desarrollar una interfaz:** la herramienta seleccionada tiene que ser adecuada para el desarrollo de una interfaz gráfica de usuario. Este criterio tendrá una gran importancia frente al resto, ya que es indispensable para llevar a cabo el Proyecto.
- **Costes económicos:** las herramientas se han valorado mejor cuanto menores costos suponga el disponer de una licencia para su uso.
- **Tiempos de simulación:** es importante que los tiempos de simulación sean lo más cortos posible, ya que supone un ahorro de tiempos significativo.

6.3.6. Resultados del análisis

Al igual que se ha hecho anteriormente para la selección de una alternativa, se va a analizar en qué grado cumple cada herramienta mencionada cada criterio de selección y qué criterio es más importante que otro. Esto se realiza otorgando a cada criterio una ponderación o peso y asignando para cada herramienta planteada una puntuación a cada criterio que satisfaga en mayor o menor grado.

La ponderación se ha llevado a cabo de la misma manera que para la selección de la alternativa, es decir, mediante la asignación de un porcentaje de peso a cada criterio de selección, dando una suma total del 100 %. La puntuación, por su parte, se ha efectuado otorgando un valor de 1 a 5 para cada criterio que satisface cada herramienta, siendo 1 el menor nivel de satisfacción y 5 el mayor. La puntuación final de cada herramienta se ha calculado sumando todas las puntuaciones que se conceden a cada criterio multiplicadas por la ponderación de cada uno de ellos, quedando una puntuación total de entre 1 y 5 puntos para cada herramienta software planteada.

En la Tabla 4 se recogen los resultados que se han obtenido siguiendo este método:

	Ponderación	ALTERNATIVAS			
		PSCAD / EMTDC	Visual Basic	Mathcad	Matlab - GUIDE
Sencillez de manejo	10%	5	4	5	5
Flexibilidad	20%	5	3	4	5
Posibilidad de desarrollar una interfaz	45%	3	4	1	5
Costes económicos	15%	3	5	3	2
Tiempos de simulación	10%	3	3	3	3
TOTAL	100%	3,6	3,85	2,5	4,35

Tabla 4. Resultados de la valoración de las herramientas software.

Como puede observarse a partir de los resultados de la Tabla 4, Matlab es la herramienta más adecuada para llevar a cabo el desarrollo de la interfaz gráfica de usuario, que es el principal objetivo de este proyecto. La principal desventaja que presenta Matlab es el coste de su licencia. Sin embargo, a pesar de ello, las ventajas que presenta compensan este hecho de manera significativa. La herramienta GUIDE que incorpora es de uso sencillo, intuitivo y flexible para diseñar interfaces gráficas. Otros programas aludidos como PSCAD / EMTCD o Visual Basic también ofrecen la posibilidad de diseñar interfaces gráficas; sin embargo, la herramienta GUIDE es más sencilla que la herramienta PSCAD, y Visual Basic es más apropiado para trabajar con bases de datos, mientras que Matlab es óptimo para trabajar con análisis numérico y visualización de datos, entre otros.

En definitiva, la herramienta GUIDE de Matlab es la herramienta seleccionada para llevar a cabo el proyecto. La herramienta permite diseñar una aplicación con la que se pueden obtener las condiciones de carga a las que trabaja un grupo de transformadores acoplados en paralelo.

7. DESCRIPCIÓN DE LA SOLUCIÓN

Habiéndose seleccionado Matlab – GUIDE como herramienta para llevar a cabo el desarrollo de la aplicación software o interfaz gráfica de usuario que constituye el principal objetivo del presente Trabajo, se va a describir en este apartado el desarrollo y funcionamiento de la interfaz.

7.1. La herramienta GUIDE de Matlab

Como ya se ha mencionado anteriormente, GUIDE es una herramienta interna de Matlab que ofrece la posibilidad de desarrollar interfaces gráficas de usuario.

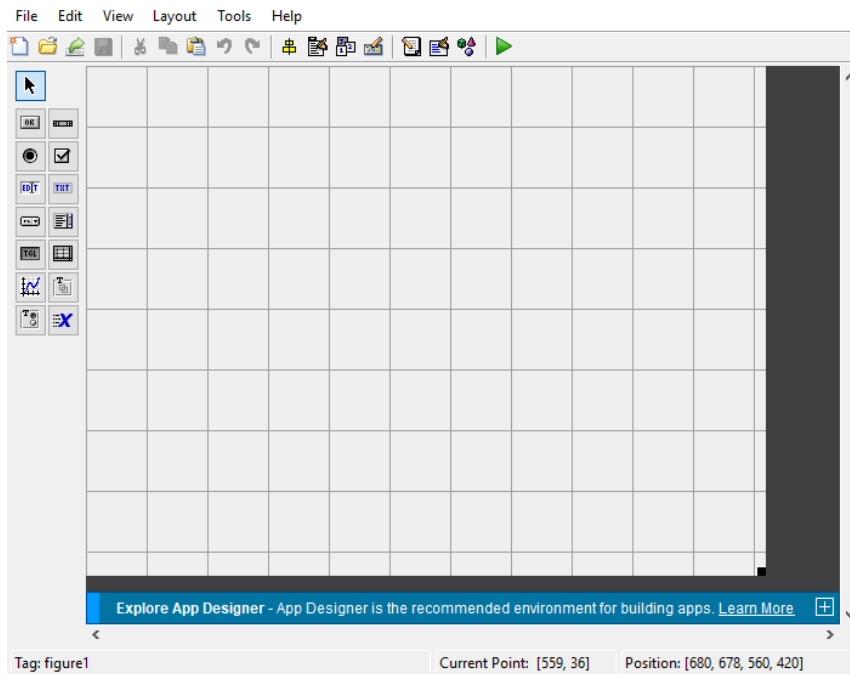


Figura 14. Entorno de la herramienta GUIDE de Matlab.

Tal y como se observa en la parte izquierda de la Figura 14, GUIDE ofrece la posibilidad de añadir diferentes elementos para el diseño de la interfaz gráfica, tales como textos editables, textos estáticos, botones, menús, botones, *checkboxes*, etc.

En la interfaz desarrollada para este proyecto, se ha utilizado los siguientes elementos:

- **Panel**, paneles con el objetivo de organizar visualmente cada parte o función de la interfaz.

- **Static Text**, textos estáticos no editables directamente por el usuario para proporcionar información al usuario.
- **Edit Text**, casillas para introducir o modificar el texto en ellas, con el objetivo de que el usuario introduzca información; en este caso, los valores numéricos que se especifican.
- **Push Button**, botones sobre los que se pulsa y, al hacerlo, el programa ejecuta una o varias funciones determinadas.
- **Radio Button**, botones de activación / desactivación que se activan o desactivan al pulsarlos, con el objetivo de establecer un estado booleano (activado o desactivado) concreto para determinada variable.
- **Button Group**, panel en el cual se incluyen varios *radio button*, de manera que tan únicamente uno de ellos pueda estar activado; al activar uno, se desactivan los demás.

Salvo para el caso del *static text*, el usuario puede actuar sobre todos estos elementos directamente, y cada elemento cuenta con un *script* programable en el que es posible asignarle la función correspondiente que tiene que llevar a cabo cuando el usuario interactúe sobre él. Asimismo, el programa puede modificar aspectos de cualquier elemento de la interfaz, incluidos los *static text*, haciéndole visible la información que sea conveniente al usuario.

7.2. La interfaz gráfica desarrollada

A continuación se presenta la interfaz gráfica que se ha llevado a cabo en este Trabajo de Fin de Grado. Esta interfaz permite conocer el índice de carga de un grupo de transformadores trifásicos acoplados en paralelo, el reparto de la carga en ellos, y la caída de tensión en bornes de la carga que están alimentando. Todo ello lo realiza a partir de datos características de la red (tensión de la red en el primario), de los transformadores acoplados (potencia nominal, relación nominal de tensiones, tensión de cortocircuito y ángulo de la impedancia interna) y de la carga (potencia demandada por la carga, factor de potencia y carácter inductivo o capacitivo de ésta).

Para el desarrollo del programa se ha supuesto de antemano que la relación entre los índices horarios del grupo de transformadores es tal que permite su acoplamiento en paralelo, y que para su óptimo funcionamiento, el ángulo característico de la impedancia interna es idéntico en todos los transformadores, si bien es uno de los datos a introducir por el usuario.

En las siguientes Figuras 15 y 16 se muestra la apariencia de la interfaz gráfica de usuario desarrollada durante el proyecto, tanto en el entorno de GUIDE (Figura 15) donde se ha diseñado como su apariencia final una vez se ejecuta (Figura 16).

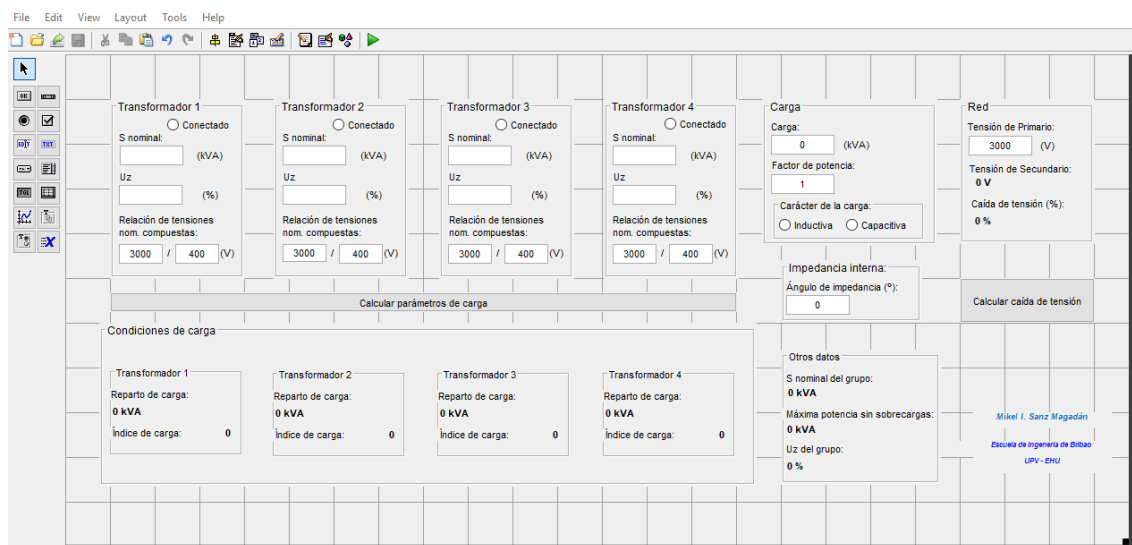


Figura 15. Entorno de trabajo en GUIDE: diseño de la aplicación.

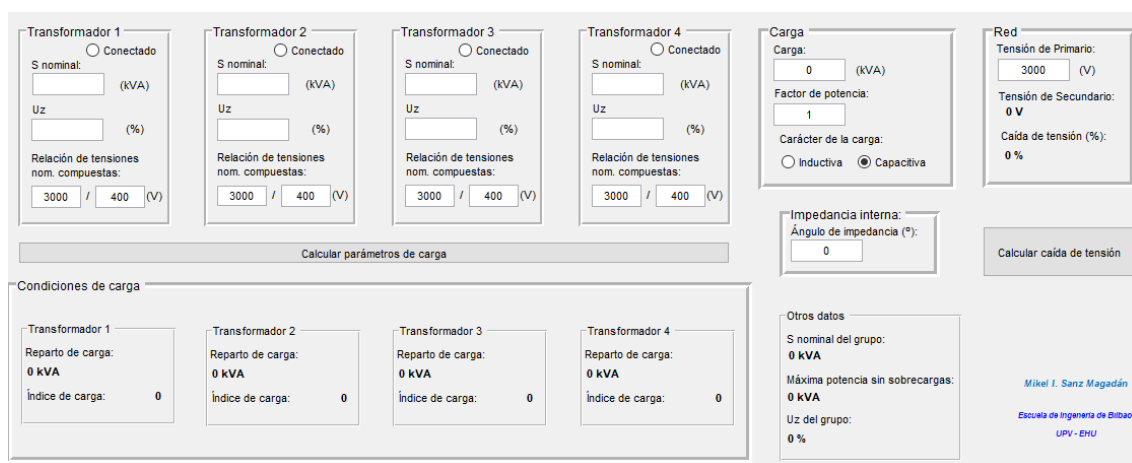


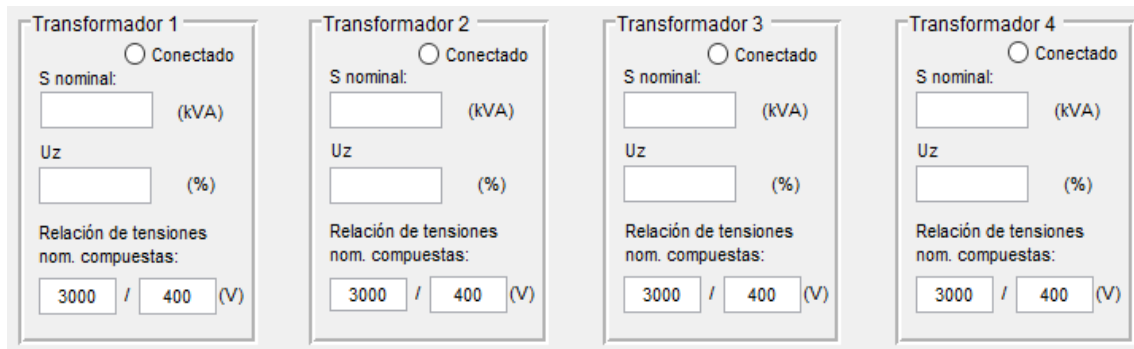
Figura 16. Apariencia de la interfaz gráfica de usuario.

La aplicación está dividida en dos grandes bloques fundamentales. Por un lado, los paneles que contienen información a introducir por el usuario. En la parte superior izquierda se hallan los paneles relativos a la información específica de cada transformador. En la parte superior derecha, se encuentran los paneles relativos a la carga, la red y la impedancia equivalente de los transformadores. Por otro lado, en la parte inferior se hay un panel con los resultados para cada transformador; a saber, el índice de carga y el reparto de la carga en cada uno de ellos. Más a la derecha, un panel

bajo el nombre de *otros datos* ofrece información sobre el grupo de transformadores acoplados: la tensión de cortocircuito del grupo, la potencia nominal del grupo y la máxima potencia sin sobrecargas. A continuación se analizará en mayor profundidad cada fracción de la interfaz.

7.2.1. Paneles de los transformadores

Los paneles de los transformadores contienen la información característica de cada transformador que el usuario tiene que introducir en el programa, tal y como se aprecia en la Figura 17:



The figure shows four identical panels for configuring transformers, labeled 'Transformador 1' through 'Transformador 4'. Each panel includes a radio button for 'Conectado', a text input field for 'S nominal' (kVA), a text input field for 'Uz' (%), and a text input field for 'Relación de tensiones nom. compuestas' (V) with a default value of '3000 / 400'.

Figura 17. Paneles de los transformadores.

La aplicación está diseñada para el estudio del acoplamiento en paralelo de un máximo de cuatro transformadores. La interfaz dispone de cuatro paneles de transformadores, uno para cada transformador. Cada panel cuenta asimismo con cuatro cajas de texto editable, en las que se deben introducir para cada uno de los transformadores los datos relativos a la potencia nominal (S_N), tensión de cortocircuito (u_z) y las tensiones nominales de primario y secundario. Estos dos últimos datos vienen por defecto inicializados en 3000 V y 400 V, respectivamente. Cada panel cuenta con un botón para indicar si el transformador en cuestión se encuentra o no conectado.

Los valores introducidos por el usuario se obtienen mediante el uso de la función *get* de la que dispone Matlab. Por ejemplo, para obtener la tensión nominal del transformador 1, se obtiene el valor introducido y después se convierte de formato texto a número mediante *str2num*. Si no se ha introducido nada, se asigna el valor cero:

```
S_NT = get(hObject, 'String');  
handles.SNT1 = str2num(S_NT);  
if isempty(str2num(S_NT));  
    handles.SNT1 = 0;  
end  
guidata(hObject, handles);
```

Esto se realiza para adquirir los datos las cuatro casillas de texto editable mencionadas de los cuatro transformadores. Existe una función *Callback* asociada a cada elemento del cual se quieren obtener los datos.

Para obtener el valor del botón que indica si el transformador está conectado, habrá que utilizar la variable *Value* del elemento en lugar de la variable *String*, siendo en esta ocasión un dato de tipo *bool*:

```
conectado = get(hObject, 'Value');  
if conectado ~= 1  
    conectado = 0;  
end  
handles.conectado3 = conectado;  
guidata(hObject, handles);
```

Esto se realiza a su vez para adquirir la información sobre el estado de conexión de los cuatro transformadores.

7.2.2. Paneles de red, carga e impedancia interna del transformador

The image shows a graphical user interface with three distinct panels. The top-left panel, titled 'Carga', contains three input fields: 'Carga:' with the value '0' and unit '(kVA)', 'Factor de potencia:' with the value '1', and 'Carácter de la carga:' with two radio buttons, 'Inductiva' and 'Capacitiva', where 'Capacitiva' is selected. The bottom-left panel, titled 'Impedancia interna:', contains one input field for 'Ángulo de impedancia (°):' with the value '0'. The right panel, titled 'Red', contains three input fields: 'Tensión de Primario:' with '3000' and unit '(V)', 'Tensión de Secundario:' with '0 V', and 'Caída de tensión (%):' with '0 %'. Below these fields is a button labeled 'Calcular caída de tensión'.

Figura 18. Paneles de red, carga e impedancia interna.

En el panel de carga han de introducirse dos valores mediante las cajas de texto editable disponibles para ello: una para la carga, y otra para el factor de potencia de la misma. Asimismo, hay un grupo de botones para indicar si la carga es inductiva o capacitiva, donde únicamente uno de los dos puede estar activado; en cuanto se activa uno, se desactiva el otro y viceversa. En el panel relativo a la impedancia interna, únicamente ha de introducirse el ángulo de la impedancia en la casilla de texto editable disponible para ello. Finalmente, en el panel de la red, se tiene que introducir el dato

relativo a la tensión de la red. La forma en la que el programa obtiene los datos de las casillas de texto es la misma que en el apartado anterior, mediante el comando `get` y después mediante el comando `str2num` para pasar a formato número.

Para obtener el valor de la tensión de la red en el primario:

```
U = get(hObject, 'String');  
handles.Uprim = str2num(U);  
guidata(hObject, handles);
```

Para obtener el valor de la carga:

```
carga = get(hObject, 'String');  
carga = str2num(carga);  
handles.carga = carga;  
guidata(hObject, handles);
```

Para obtener el valor del factor de potencia.

```
cosphi = get(hObject, 'String');  
cosphi = str2num(cosphi);  
handles.cosphi = cosphi;  
guidata(hObject, handles);
```

Dentro del panel de la red, existen otros dos datos relevantes: la tensión del secundario y la caída de tensión. Aparecen como textos estáticos porque son variables que el programa calcula y muestra una vez finalizada la ejecución. Lo relativo a los cálculos que realiza el programa se va a mencionar más adelante.

El botón *Calcular caída de tensión* ejecuta una función que efectúa los cálculos necesarios para calcular la caída de tensión y tensión en el secundario y escribe estos sobre los textos estáticos correspondientes. Más adelante se entrará en detalle, al tratarse de un elemento encargado de los cálculos.

Asimismo, la operación para que el programa recoja el dato relativo al carácter de la carga (inductiva o capacitiva) se va a mencionar más adelante, ya que esto realiza dentro de una de las funciones encargadas de llevar a cabo los cálculos.

7.2.3. Paneles de las condiciones de carga de los transformadores

En la parte inferior izquierda aparece el panel relativo a las condiciones de carga de los transformadores. Dentro de este panel, existen cuatro subpaneles, cada uno mostrando los datos de cada transformador. En la Figura 19 se muestra la apariencia de este panel:

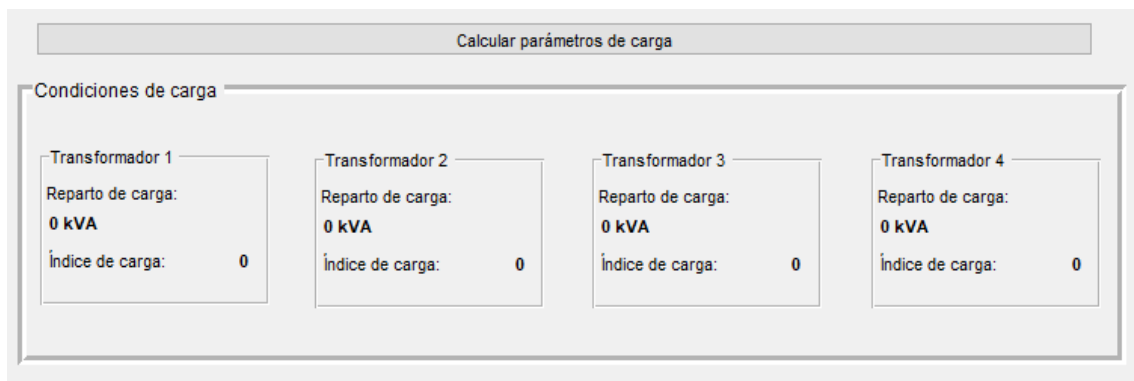


Figura 19. Panel de las condiciones de carga de los transformadores.

Encima del panel se encuentra el botón *Calcular parámetros de carga* que, al pulsar sobre él, ejecuta una función encargada de calcular las condiciones de carga del grupo de transformadores y de hacer visibles en la interfaz las variables más características de este proceso. Para ello, la función escribe sobre los textos estáticos correspondientes a cada variable. Más adelante se entrará más en detalle.

Asimismo, en la parte inferior de cada panel aparecerá un texto con la palabra *SOBRECARGADO* en caso de que el transformador correspondiente entre en la situación de sobrecarga, trabajando por encima de la intensidad nominal.

7.2.4. Panel de otros datos de interés

En el panel bajo el nombre de *otros datos*, en la parte inferior derecha, se muestran otros datos de interés en el acoplamiento en paralelo de transformadores.

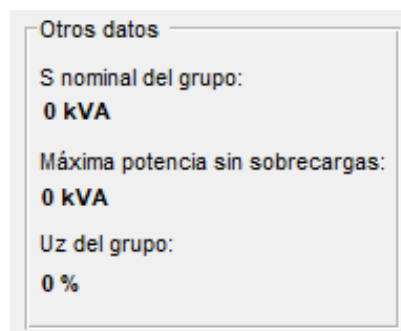


Figura 20. Panel de otros datos de interés del grupo.

Los variables que se muestran (potencia nominal del grupo, máxima potencia sin sobrecargas y la tensión de cortocircuito del grupo) aquí son calculadas por el programa

mediante la función ejecutada al pulsar el botón *Calcular parámetros de carga* que se ha mencionado en el apartado anterior. La función escribe estos resultados sobre los textos estáticos disponibles para ello.

7.2.4. Cálculo de los parámetros de carga

Una vez se ha introducido de forma correcta toda la información en los paneles de los transformadores, en el panel de la red y el valor de la carga en el panel de la carga, se pulsa el botón *Calcular parámetros de carga* para que el programa realice los cálculos relativos a las condiciones de carga de los transformadores, así como los relativos al resto de datos del grupo de transformadores. No es necesario que se haya introducido el factor de potencia o el ángulo de la impedancia, ya que estas variables no son necesarias en este procedimiento, sino que lo serán para el cálculo de la caída de tensión.

Aquellos valores que se desea hacer visibles son escritos sobre los textos estáticos disponibles para ello. Matlab cuenta con una función *set* que posibilita modificar los diferentes aspectos de los elementos que hay en la interfaz; entre ellos, el texto. Aquí se muestra un fragmento del código como ejemplo de uso del comando *set* para escribir los valores de reparto de carga así como del índice de carga para cada transformador:

```
set(handles.rep1, 'String', [num2str(v_ST(1)), ' kVA']);
set(handles.rep2, 'String', [num2str(v_ST(2)), ' kVA']);
set(handles.rep3, 'String', [num2str(v_ST(3)), ' kVA']);
set(handles.rep4, 'String', [num2str(v_ST(4)), ' kVA']);

set(handles.icarga1, 'String', num2str(i_T(1)));
set(handles.icarga2, 'String', num2str(i_T(2)));
set(handles.icarga3, 'String', num2str(i_T(3)));
set(handles.icarga4, 'String', num2str(i_T(4)));
```

Dentro de la función encargada de estos cálculos también se incluyen algunas comprobaciones imprescindibles para que el funcionamiento de los transformadores acoplados sea correcto. Se verifican una serie de condiciones que han de cumplirse y, en caso de que no se cumplan, se muestran unos mensajes de error o advertencias.

Matlab cuenta con un comando o función *warnDlg* que ofrece la posibilidad de mostrar en pantalla mensajes de advertencia como los necesarios en estos casos. Estos mensajes se muestran en los siguientes casos:

- En el caso de que la tensión de la red supere la tensión nominal de alguno de los transformadores:

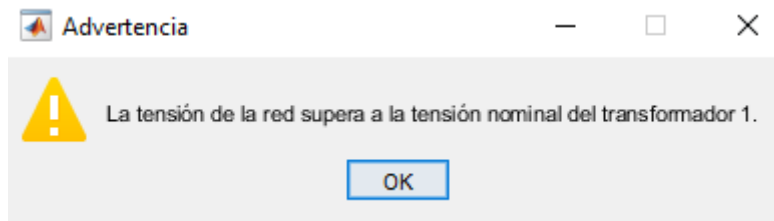


Figura 21. Mensaje de advertencia de sobretensión.

El fragmento del código que posibilita ofrecer este tipo de mensajes cuenta con una función *if* de comprobación de que la tensión del primario de la red supera a la nominal del primario del transformador:

```
if handles.Uprim > handles.Ulp;  
    warndlg('La tensión de la red supera a la tensión  
           nominal del transformador 1.', 'Advertencia')  
end
```

- En el caso de que no coincidan las relaciones de transformación de todos los transformadores, también se muestra el siguiente mensaje de advertencia:

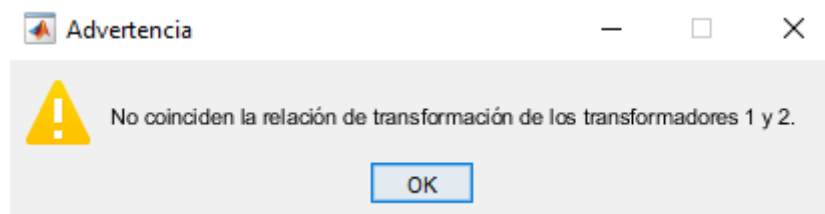


Figura 22. Mensaje de advertencia sobre las relaciones de transformación.

El código es similar en este caso al del caso anterior:

```
if a1 ~= a2  
    warndlg(['No coinciden la relación de transformación de  
           los transformadores 1 y 2.'], 'Advertencia');  
end
```

- En el caso de que estén desactivados cuatro botones que indican que los transformadores en cuestión están conectados, se mostrará otro mensaje, advirtiendo de que no hay ningún transformador conectado:

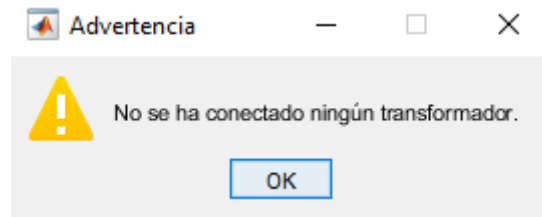


Figura 23. Mensaje de advertencia de transformadores no conectados.

El código es similar en este caso al del caso anterior:

```
if v_conec == [0 0 0 0];  
    warndlg('No se ha conectado ningún  
transformador.', 'Advertencia')  
end
```

Finalmente, para el caso de que alguno de los transformadores entrase en sobrecarga, no se ha utilizado un mensaje de advertencia como los anteriores. En este caso, debajo del panel de condiciones de carga del transformador sobrecargado se mostrará un texto estático de color rojo con la palabra *SOBRECARGADO*.

El motivo por el que no se ha utilizado una ventana de advertencia como en los casos anteriores es porque en este caso el acoplamiento sí que puede realizarse aunque algún transformador esté sobrecargado (si bien puede llegar a dar problemas), y en los casos anteriores, el acoplamiento no es posible.

7.2.5. Cálculo de la caída de tensión

El botón encargado del cálculo de la caída de tensión se encarga fundamentalmente de calcular y escribir en la interfaz los valores de la caída de tensión y la tensión de salida de secundario, dentro del panel de la red.

Para el cálculo de estos parámetros, es importante que estén introducidos todos los valores que el usuario puede introducir, incluidos los valores de ángulo de la impedancia, factor de potencia y carácter inductivo o capacitivo de la carga. También es importante que se haya pulsado anteriormente el botón *Calcular parámetros de carga* del apartado anterior, ya que para el cálculo de la caída de tensión se requiere de parámetros calculados en el proceso anterior.

De igual manera que en el apartado anterior, tras haber realizado los cálculos, se escribirán los valores de caída de tensión y tensión a la salida mediante el comando *set*, como se muestra en el siguiente fragmento del código:

```
set(handles.Ucaida, 'String', [num2str(u_caída), ' V']);  
set(handles.Usalida, 'String', [num2str(u_2), ' V']);
```


Otro aspecto relevante en esta función es el grupo de botones inductivo / capacitivo del panel de la carga. Como ya se ha mencionado, tan solo uno de ellos puede estar activado en un instante determinado.

El código del programa, mediante la función *get*, obtiene cuál de los dos está seleccionado mediante la característica *SelectedObject* del grupo de botones y, posteriormente, lee su *String* o nombre para saber si la carga es inductiva o capacitiva y, en función de ello, corregir o no el seno del ángulo característico de la carga. La función de Matlab *strcmp* se ha utilizado para comparar si dos datos de tipo *string* coinciden o no. A continuación se muestra el fragmento del código correspondiente a la determinación del carácter de la carga:

```
cosphi = abs(handles.cosphi);
senphi = (1-handles.cosphi^2)^0.5;

indcap = get(handles.indcap, 'SelectedObject')
ind_cap = get(indcap, 'String');

if strcmp(ind_cap, 'Inductiva');
    senphi = senphi;
elseif strcmp(ind_cap, 'Capacitiva');
    senphi = - senphi;
end
```

7.2.6. Resumen del funcionamiento de la interfaz gráfica

En este apartado se presenta, a modo de resumen, un diagrama de flujo que explica el funcionamiento de la interfaz de manera sencilla e intuitiva, resumiendo de forma genérica los aspectos que se han ido comentando en los apartados anteriores. En él se incluyen los pasos que se recomienda seguir para que la aplicación funcione de la manera más adecuada.

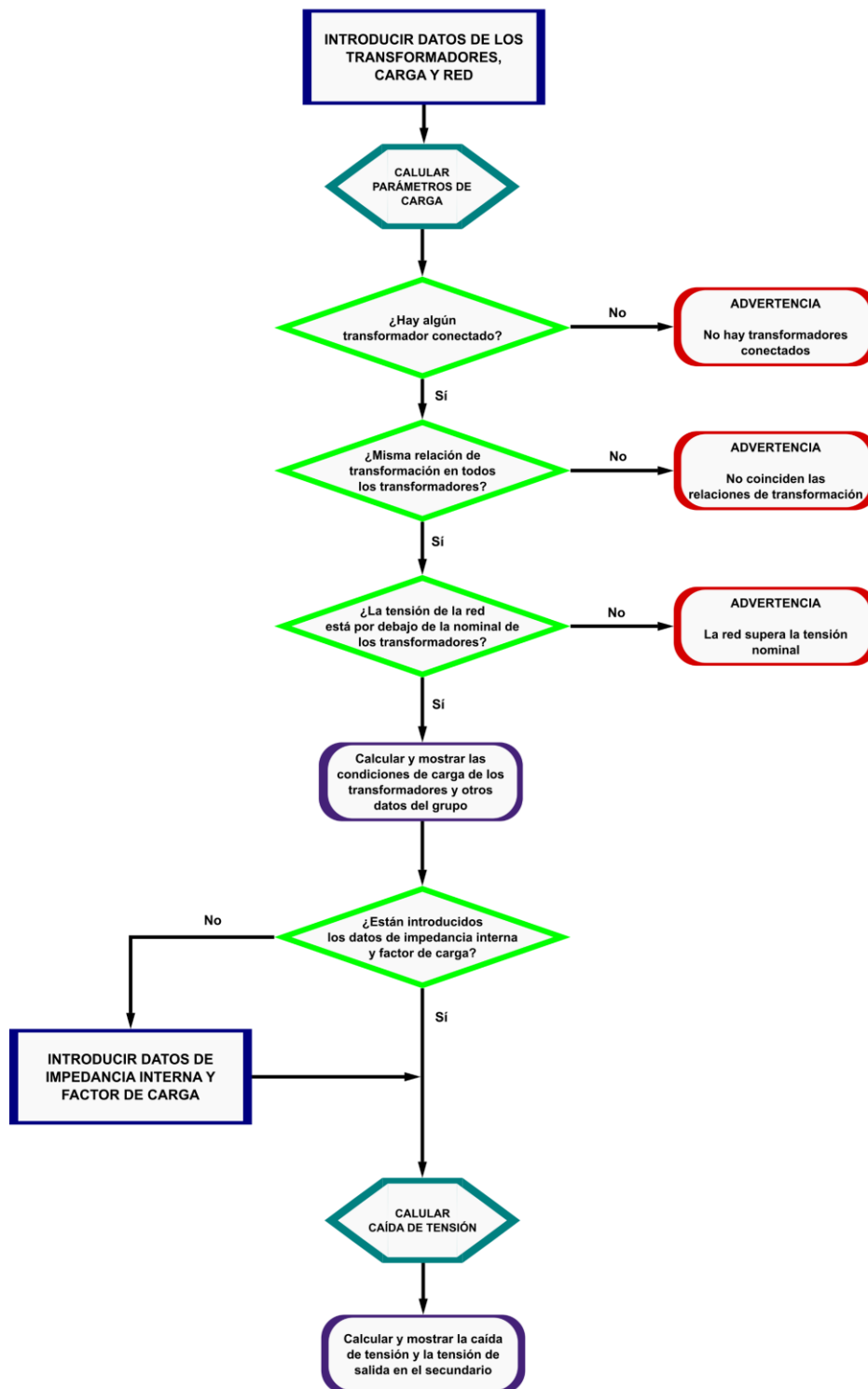


Figura 24. Diagrama de flujo del funcionamiento de la interfaz.

8. EJEMPLOS PRÁCTICOS DE APLICACIÓN

Con la finalidad de comprobar el funcionamiento de la interfaz gráfica desarrollada en este trabajo, se van a presentar dos ejemplos prácticos de aplicación.

8.1. Ejemplo de aplicación 1

Una instalación se compone de dos transformadores en paralelo con las siguientes características:

- T_1 : potencia nominal 500 kVA; tensión de cortocircuito 8 %.
- T_2 : potencia nominal 500 kVA; tensión de cortocircuito 7 %.

Dicha instalación ha de suministrar 1500 kVA con un factor de carga de 0.8 inductivo, para lo que se instala un tercer transformador en paralelo de 830 kVA con tensión de cortocircuito de 10 %. Los tres transformadores tienen un ángulo de impedancia de 78°. Si los tres transformadores trabajan alimentados a su tensión nominal, se quiere obtener el reparto de las cargas, índice de carga de cada transformador, potencia máxima sin sobrecargas y la caída de tensión a la salida.

En primer lugar, se introducen todos los datos necesarios en las correspondientes casillas de texto editable. Asimismo, se activan los botones de los tres transformadores que se van a conectar. Tener en cuenta que para este ejemplo no se especifica un dato concreto para la entrada de la red, sino que tan solo se pide que se alimenten los transformadores a su tensión nominal, por lo que se dejará el valor predeterminado, siendo importante para evitar errores que no supere la tensión nominal de los transformadores.

The screenshot shows a software interface for calculating transformer load distribution. It features four transformer configuration panels (Transformador 1 to 4), a load configuration panel (Carga), a network configuration panel (Red), a calculation button (Calcular parámetros de carga), a results section (Condiciones de carga), and an additional data section (Otros datos). The results show NaN values for load distribution and indices, indicating that the calculation has not yet been performed or is incomplete. The interface also includes a user name and affiliation.

Figura 25. Ejemplo 1: datos a introducir por el usuario.

Una vez introducidos los datos, se presiona el botón *Calcular parámetros de carga* para obtener las condiciones de carga de los transformadores y el resto de datos característicos del grupo.

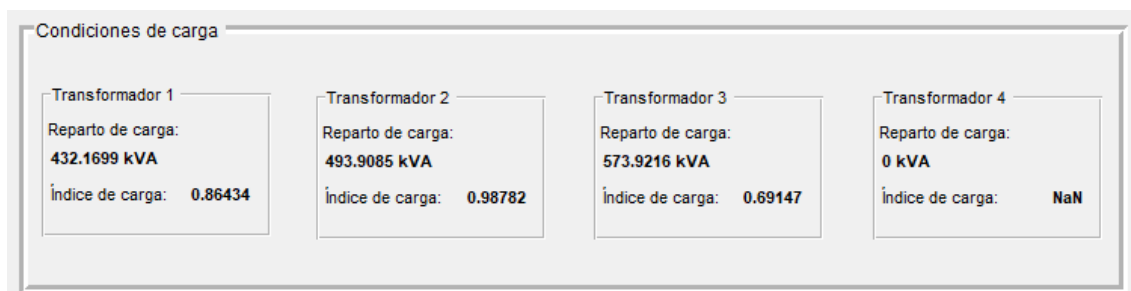


Figura 26. Ejemplo 1: resultados de las condiciones de carga.

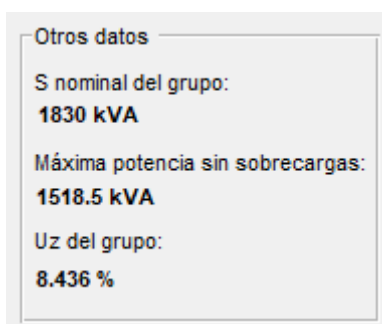


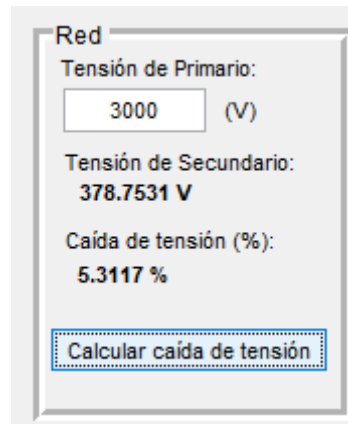
Figura 27. Ejemplo 1: resultados de otros datos característicos del grupo.

Observando los resultados obtenidos, ya se dispone de algunos de los resultados que se pedían en el problema:

- Reparto de cargas de los transformadores:
 - 432,17 kVA (T_1)
 - 493,9 kVA (T_2)
 - 573,9 kVA (T_3)
- Índices de carga:
 - 0,864 (T_1)
 - 0,988 (T_2)
 - 0,691 (T_3)
- Máxima potencia sin sobrecargas: 1518,5 kVA

Habiendo obtenido esta información, aún es necesario obtener la caída de tensión en el secundario, para lo cual es necesario haber introducido el ángulo de la impedancia, haber seleccionado si la carga es inductiva o capacitiva en el panel de la

carga y haber calculado ya los parámetros de carga. Si esto está realizado, a continuación hay que pulsar el botón *Calcular caída de tensión*. Una vez pulsado, el panel de red se actualizará y se podrá conocer la caída de tensión:



Red

Tensión de Primario:
3000 (V)

Tensión de Secundario:
378.7531 V

Caída de tensión (%):
5.3117 %

Calcular caída de tensión

Figura 28. Ejemplo 1: cálculo de la caída de tensión.

Se observa que ya se dispone del último dato que se pedía: la caída de tensión es del 5,31 %.

8.2. Ejemplo de aplicación 2

Una línea trifásica está alimentada por dos transformadores trifásicos con las siguientes características:

- T_1 : potencia nominal 1000 kVA; tensión de cortocircuito 6 %.
- T_2 : potencia nominal 1000 kVA; tensión de cortocircuito 4 %.
- Relación de tensiones compuestas: 25.000 / 250 V.
- Ángulo de la impedancia interna: 68° .

Se quiere aumentar la potencia instalada, acoplando a la red un tercer transformador con estas características:

- T_3 : potencia nominal 2500 kVA; tensión de cortocircuito 5 %.
- Relación de tensiones compuestas: 30.000 / 300 V.

Se quiere conocer si el grupo de transformadores es capaz, conectado a una red de 25 kV, es capaz de suministrar 5000 kVA a una carga de carácter capacitivo con factor de potencia 0.6, sin que los transformadores entren en sobrecarga. En caso de que

Trabajo de Fin de Grado (TFG): Diseño de una aplicación software para el cálculo del acoplamiento en paralelo de transformadores.

alguno entre en sobrecarga, determinar la potencia máxima que el grupo es capaz de suministrar sin sobrecargas, así como la tensión a la salida del secundario.

En primer lugar, como en el ejemplo anterior, se introducen los datos necesarios para el problema en la interfaz gráfica.

The screenshot shows a software interface for inputting data for a transformer group. It includes four transformer input panels (Transformador 1 to 4), a load input panel (Carga), and a secondary voltage input panel (Red). Each transformer panel has fields for nominal power (S nominal), utilization factor (Uz), and primary/secondary voltage ratio. The load panel includes fields for total load (Carga), power factor (Factor de potencia), and load character (Inductiva or Capacitiva). The secondary voltage panel includes fields for primary and secondary voltage and a percentage drop. A 'Calcular parámetros de carga' button is located below the transformer panels. Below this, a 'Condiciones de carga' section shows the results for each transformer, including load distribution (Reparto de carga) and load index (Índice de carga). The 'Otros datos' section shows the total nominal power (S nominal del grupo), maximum power without overloads (Máxima potencia sin sobrecargas), and group utilization factor (Uz del grupo). The interface is attributed to Mikel I. Sanz Magadán, Escuela de Ingeniería de Bilbao, UPV - EHU.

Figura 29. Ejemplo 2: datos a introducir por el usuario.

Una vez introducidos los datos, se calculan los parámetros de carga mediante el botón disponible para ello. Los resultados obtenidos son los siguientes:

The screenshot shows the 'Condiciones de carga' section of the software interface. It displays the results for each transformer: Transformer 1 has a load distribution of 937.5 kVA and a load index of 0.9375; Transformer 2 has a load distribution of 2109.375 kVA and a load index of 1.4063, which is highlighted in red and labeled 'SOBRECARGADO' (overloaded); Transformer 3 has a load distribution of 1953.125 kVA and a load index of 0.9375; Transformer 4 has a load distribution of 0 kVA and a load index of NaN. The 'Otros datos' section shows the total nominal power of 0 kVA, maximum power without overloads of 0 kVA, and a group utilization factor of 0%.

Figura 30. Ejemplo 2: resultados de las condiciones de carga.

Se observa que el segundo transformador está sobre cargado, trabajando con índice de carga mayor a la unidad, luego se puede concluir lo siguiente:

- El grupo de transformadores no puede suministrar 5000 kVA sin sobrecargas.

A continuación, se muestran los parámetros relativos al grupo de transformadores que se han obtenido junto con los anteriores:

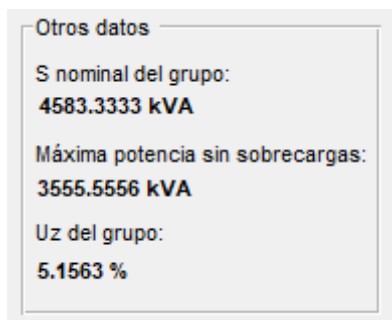


Figura 31. Ejemplo 2: resultados de otros datos característicos del grupo.

Con esta información podemos concluir lo siguiente:

- La potencia máxima sin sobrecargas que el grupo de transformadores puede suministrar es de 3555,56 kVA.

Finalmente quedaría conocer la tensión a la salida de los transformadores acoplados. Para ello, tienen que estar introducidos los parámetros de ángulo de carga, factor de potencia y carácter inductivo o capacitivo de la carga (en la Figura 27 ya se han introducido). Al pulsar sobre el botón *Calcular caída de tensión*, el panel de la red queda así:

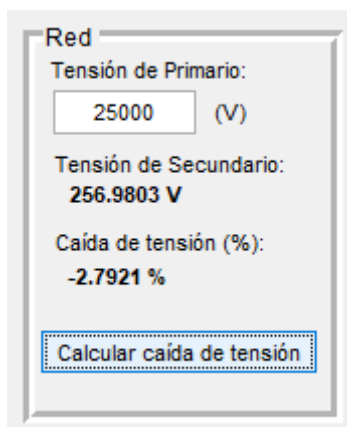


Figura 32. Ejemplo 2: cálculo de la caída de tensión.

Por tanto, ya se dispone del último dato que se necesitaba:

- La tensión a la salida se incrementa en un 2,79 % sobre la nominal, llegando a ser de 256,98 V.

9. DESCRIPCIÓN DE TAREAS

En este apartado se van a describir las etapas y tareas en las que se ha dividido el trabajo para la realización de este proyecto. En el presente Trabajo han participado el director del Trabajo y el alumno que realiza el Trabajo de Fin de Grado. Las tareas pueden agruparse en diferentes bloques:

- **Tareas de investigación:** las primeras tareas se corresponden con las tareas de investigación, donde el alumno ha tomado contacto con el tema a desarrollar en el TFG, mediante la búsqueda de información y aprendizaje del manejo de la herramienta software (Matlab – GUIDE) que se ha utilizado para el desarrollo del trabajo.
- **Desarrollo del software:** en esta etapa se incluyen las tareas en las que el alumno ha progresado en el desarrollo de la interfaz gráfica, con las reuniones con el director que ha habido para la valoración del estado del trabajo.
- **Redacción del Trabajo:** finalmente, una vez terminado el desarrollo de la interfaz gráfica de usuario, se comienza con el bloque final, correspondiente a la redacción del Trabajo.

A continuación se presenta el diagrama de Gantt, donde se observa el progreso del trabajo desde el comienzo del proyecto el día 22 de enero de 2019 hasta su finalización el día 21 de julio de 2019.

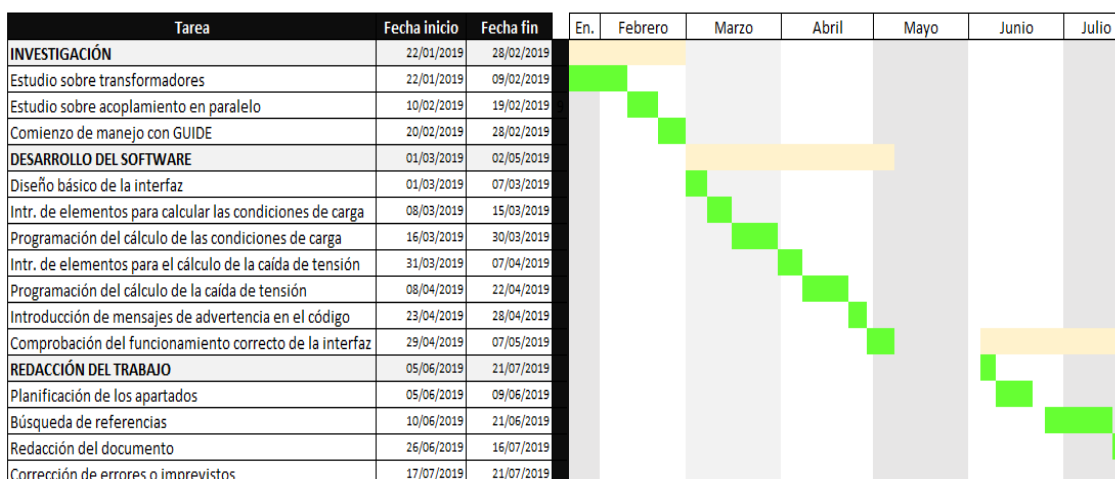


Figura 33. Diagrama de Gantt

10. PRESUPUESTO

Para el presupuesto se han considerado tres partidas presupuestarias. Primero, la partida presupuestaria correspondiente a las horas internas que los ingenieros superior y graduado han dedicado. Por otro lado están las amortizaciones, correspondientes a las licencias de Matlab, de Office y la amortización del ordenador utilizado. Como última partida, se han considerado otros gastos como el material de oficina. Finalmente, también se han tenido en cuenta un 5 % de gastos imprevistos.

Concepto	Nº de horas	coste horario	Total
Ingeniero graduado	190	25,00 €	4.750,00 €
Ingeniero superior	50	50,00 €	2.500,00 €
SUBTOTAL			7.250,00 €

Tabla 5. Partida presupuestaria de horas internas.

Concepto	Coste	Horas útiles	Horas de utilización	Total
Licencia Matlab	70,00 €	1600	75	3,28 €
Licencia Office	150,00 €	3000	140	7,00 €
Ordenador	950,00 €	16000	215	12,77 €
SUBTOTAL				23,05 €

Tabla 6. Partida presupuestaria de horas internas.

Concepto	Total
Material de oficina	25,00 €
SUBTOTAL	25,00 €

Tabla 7. Partida presupuestaria de otros gastos.

RESUMEN	
Horas internas	7.250,00 €
Amortizaciones	23,05 €
Gastos	25,00 €
SUBTOTAL	7.298,05 €
Costes indirectos (5 %)	364,90 €
TOTAL	7.662,95 €

Tabla 8. Resumen del presupuesto

11. CONCLUSIONES

Tras haber realizado este trabajo, se pueden extraer las siguientes conclusiones acerca del cálculo del acoplamiento en paralelo de transformadores:

- El acoplamiento en paralelo de transformadores es ampliamente utilizado en el Sistema Eléctrico de Potencia para poder satisfacer la demanda de energía por parte de la carga conectada sin que haya problemas en los equipos de transformación. Por ello, el acoplamiento en paralelo es un aspecto que merece una atención especial.
- El poder disponer de una aplicación software o interfaz gráfica de usuario le supone una clarísima ventaja al personal que trabaja en ello, pudiendo predecir los fallos que puedan ocurrir, por ejemplo por sobrecarga de los transformadores, y así evitándolos.
- La interfaz gráfica puede ser fácilmente modificable para adaptarla a las nuevas necesidades que vayan surgiendo, permitiendo así un amplio rango de posibilidades de uso. La interfaz gráfica desarrollada en este mismo Trabajo de Fin de Grado tiene la posibilidad de ser ampliada con pequeños cambios en el código y en la interfaz.
- La posibilidad de diseñar interfaces gráficas de este tipo es relativamente reciente, con mejoras continuas por parte de los desarrolladores de este tipo de software, por lo que se le puede augurar un gran futuro al campo de la simulación por ordenador, lo que sin duda repercutirá positivamente en ámbitos muy diversos de la Ingeniería.

12. REFERENCIAS

- [1] **A. J. Mazón et al.**, Guía de autoaprendizaje de máquinas eléctricas, PEARSON, 2008.
- [2] «**Red Eléctrica de España - REE**» [En línea]. Available: <https://www.ree.es/es>.
- [3] **J. W. Coltman**, «The Transformer,» *IEEE Industry Application Magazine*, 2002.
- [4] **J. Calvert**, *Inside Transformers*, University of Denver, 2001.
- [5] **J. Fraile Mora**, Máquinas Eléctricas, Madrid: McGRAW - HILL, 2003.
- [6] **L. Haibo et al.**, «Parallel operation of electronic power transformer based on distributed logic control,» College of Electric and Electronic Engineering, Huazhong Univ., 2007.
- [7] **M. I. Zamora et al.**, Simulación de Sistemas Eléctricos, Madrid: PEARSON, 2005.
- [8] «**GUI de Matlab**» MathWorks, [En línea]. Available: <https://es.mathworks.com/discovery/matlab-gui.html>.

13. ANEXO – CÓDIGO DE LA INTERFAZ GRÁFICA

```
function varargout = appTFG2(varargin)

% Begin initialization code - DO NOT EDIT
gui_Singleton = 1;
gui_State = struct('gui_Name',       mfilename, ...
                  'gui_Singleton',   gui_Singleton, ...
                  'gui_OpeningFcn',  @appTFG2_OpeningFcn, ...
                  'gui_OutputFcn',   @appTFG2_OutputFcn, ...
                  'gui_LayoutFcn',   [], ...
                  'gui_Callback',    []);
if nargin && ischar(varargin{1})
    gui_State.gui_Callback = str2func(varargin{1});
end

if nargout
    [varargout{1:nargout}] = gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
else
    gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
end
% End initialization code - DO NOT EDIT

% --- Executes just before appTFG2 is made visible.
function appTFG2_OpeningFcn(hObject, ~, handles, varargin)

% ===== INICIALIZACION DE VARIABLES ===== %

handles.output = hObject;
handles.Uprim=3000;
handles.SNT1 = 0;
handles.SNT2 = 0;
handles.SNT3 = 0;
handles.SNT4 = 0;
handles.Uz1 = 100;
handles.Uz2 = 100;
handles.Uz3 = 100;
handles.Uz4 = 100;
handles.U1p = 3000;
handles.U2p = 3000;
handles.U3p = 3000;
handles.U4p = 3000;
handles.U1s = 400;
handles.U2s = 400;
handles.U3s = 400;
handles.U4s = 400;
handles.carga = 0;
handles.cosphi = 1;
handles.phie = 0;
guidata(hObject, handles);

function varargout = appTFG2_OutputFcn(~, ~, handles)
varargout{1} = handles.output;

function Snom1_Callback(hObject, eventdata, handles)
```

Trabajo de Fin de Grado (TFG): Diseño de una aplicación software para el cálculo del acoplamiento en paralelo de transformadores.

```
S_NT = get(hObject,'String');
handles.SNT1 = str2num(S_NT);
if isempty(str2num(S_NT));
    handles.SNT1 = 0;
end
guidata(hObject,handles);

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function Snom1_CreateFcn(hObject, ~, ~)

if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function Uz1_Callback(hObject, eventdata, handles)

Uz = get(hObject,'String');
handles.Uz1 = str2num(Uz);
if isempty(str2num(Uz));
    handles.Uz1 = 0;
end
guidata(hObject,handles);

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function Uz1_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)

if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function Uz4_Callback(hObject, ~, handles)

Uz = get(hObject,'String');
handles.Uz4 = str2num(Uz);
if isempty(str2num(Uz));
    handles.Uz4 = 0;
end
guidata(hObject,handles);

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function Uz4_CreateFcn(hObject, eventdata, ~)

if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function Snom4_Callback(hObject, eventdata, handles)
```

Trabajo de Fin de Grado (TFG): Diseño de una aplicación software para el cálculo del acoplamiento en paralelo de transformadores.

```
S_NT = get(hObject,'String');
handles.SNT4 = str2num(S_NT);
if isempty(str2num(S_NT));
    handles.SNT4 = 0;
end
guidata(hObject,handles);

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function Snom4_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)

if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUiControlBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

% --- Executes on button press in conectado4.
function conectado4_Callback(hObject, eventdata, handles)

conectado = get(hObject,'Value');
if conectado ~= 1
    conectado = 0;
end
handles.conectado4 = conectado;
guidata(hObject,handles);

function Uz3_Callback(hObject, eventdata, handles)

Uz = get(hObject,'String');
handles.Uz3 = str2num(Uz);
if isempty(str2num(Uz));
    handles.Uz3 = 0;
end
guidata(hObject,handles);

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function Uz3_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)

if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUiControlBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function Snom3_Callback(hObject, eventdata, handles)

S_NT = get(hObject,'String');
handles.SNT3 = str2num(S_NT);
if isempty(str2num(S_NT));
    handles.SNT3 = 0;
end
guidata(hObject,handles);
```

Trabajo de Fin de Grado (TFG): Diseño de una aplicación software para el cálculo del acoplamiento en paralelo de transformadores.

```
% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function Snom3_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)

if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUiControlBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

% --- Executes on button press in conectado3.
function conectado3_Callback(hObject, eventdata, handles)

conectado = get(hObject,'Value');

if conectado ~= 1
    conectado = 0;
end
handles.conectado3 = conectado;
guidata(hObject,handles);

function Uz2_Callback(hObject, ~, handles)

Uz = get(hObject,'String');
handles.Uz2 = str2num(Uz);
if isempty(str2num(Uz));
    handles.Uz2 = 0;
end
guidata(hObject,handles);

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function Uz2_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)

if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUiControlBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function Snom2_Callback(hObject, ~, handles)

S_NT = get(hObject,'String');
handles.SNT2 = str2num(S_NT);
if isempty(str2num(S_NT));
    handles.SNT2 = 0;
end
guidata(hObject,handles);

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function Snom2_CreateFcn(hObject, eventdata, ~)
```

Trabajo de Fin de Grado (TFG): Diseño de una aplicación software para el cálculo del acoplamiento en paralelo de transformadores.

```
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

% --- Executes on button press in conectado2.
function conectado2_Callback(hObject, eventdata, handles)

conectado = get(hObject,'Value');
if conectado ~= 1
    conectado = 0;
end
handles.conectado2 = conectado;
guidata(hObject,handles);

% --- Executes on button press in conectado1.
function conectado1_Callback(hObject, eventdata, handles)

conectado = get(hObject,'Value');
if conectado ~= 1
    conectado = 0;
end
handles.conectado1 = conectado;
guidata(hObject,handles);

function U4p_Callback(hObject, eventdata, handles)

Up = get(hObject,'String');
Up = str2num(Up);
handles.U4p = Up;
guidata(hObject,handles);

function U4p_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)

if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function U4s_Callback(hObject, eventdata, handles)

Up = get(hObject,'String');
Up = str2num(Up);
handles.U4s = Up;
guidata(hObject,handles);

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function U4s_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)

if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end
```



```
function U3p_Callback(hObject, eventdata, handles)

Up = get(hObject, 'String');
Up = str2num(Up);
handles.U3p = Up;
guidata(hObject, handles);

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function U3p_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)

if ispc && isequal(get(hObject, 'BackgroundColor'),
get(0, 'defaultUiControlBackgroundColor'))
    set(hObject, 'BackgroundColor', 'white');
end

function U3s_Callback(hObject, eventdata, handles)

Up = get(hObject, 'String');
Up = str2num(Up);
handles.U3s = Up;
guidata(hObject, handles);

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function U3s_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)

if ispc && isequal(get(hObject, 'BackgroundColor'),
get(0, 'defaultUiControlBackgroundColor'))
    set(hObject, 'BackgroundColor', 'white');
end

function U2p_Callback(hObject, eventdata, handles)

Up = get(hObject, 'String');
Up = str2num(Up);
handles.U2p = Up;
guidata(hObject, handles);

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function U2p_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)

if ispc && isequal(get(hObject, 'BackgroundColor'),
get(0, 'defaultUiControlBackgroundColor'))
    set(hObject, 'BackgroundColor', 'white');
end

function U2s_Callback(hObject, eventdata, handles)
```

Trabajo de Fin de Grado (TFG): Diseño de una aplicación software para el cálculo del acoplamiento en paralelo de transformadores.

```
Up = get(hObject,'String');
Up = str2num(Up);
handles.U2s = Up;
guidata(hObject,handles);

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function U2s_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)

if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function U1p_Callback(hObject, ~, handles)

Up = get(hObject,'String');
Up = str2num(Up);
handles.U1p = Up;
guidata(hObject,handles);

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function U1p_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)

if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function U1s_Callback(hObject, eventdata, handles)

Up = get(hObject,'String');
Up = str2num(Up);
handles.U1s = Up;
guidata(hObject,handles);

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function U1s_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)

if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function Uprim_Callback(hObject, eventdata, handles)

U = get(hObject,'String');
handles.Uprim = str2num(U);
guidata(hObject,handles);

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
```

Trabajo de Fin de Grado (TFG): Diseño de una aplicación software para el cálculo del acoplamiento en paralelo de transformadores.

```
function Uprim_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)

if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function carga_Callback(hObject, eventdata, handles)

carga = get(hObject,'String');
carga = str2num(carga);
handles.carga = carga;
guidata(hObject,handles);

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function carga_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

% ===== CALCULO DE LAS CONDICIONES DE CARGA ===== %

function calcular_Callback(hObject, eventdata, handles)

a1 = handles.U1p / handles.U1s;
a2 = handles.U2p / handles.U2s;
a3 = handles.U3p / handles.U3s;
a4 = handles.U4p / handles.U4s;

a = [a1 a2 a3 a4];

if a1 ~= a2
    warndlg(['No coinciden la relación de transformación de los
transformadores 1 y 2.'],'Advertencia');
end

if a1 ~= a3
    warndlg(['No coinciden la relación de transformación de los
transformadores 1 y 3.'],'Advertencia');
end

if a1 ~= a4
    warndlg(['No coinciden la relación de transformación de los
transformadores 1 y 4.'],'Advertencia');
end

c1 = handles.conectado1;
c2 = handles.conectado2;
c3 = handles.conectado3;
c4 = handles.conectado4;
```

Trabajo de Fin de Grado (TFG): Diseño de una aplicación software para el cálculo del acoplamiento en paralelo de transformadores.

```
v_conec = [c1==1 c2==1 c3==1 c4==1];
v_conec = double(v_conec)

% ===== ADVERTENCIAS ===== %

if handles.Uprim > handles.U1p;
    warndlg('La tensión de la red supera a la tensión nominal del
transformador 1.', 'Advertencia')
end

if handles.Uprim > handles.U2p;
    warndlg('La tensión de la red supera a la tensión nominal del
transformador 2.', 'Advertencia')
end

if handles.Uprim > handles.U3p;
    warndlg('La tensión de la red supera a la tensión nominal del
transformador 3.', 'Advertencia')
end

if handles.Uprim > handles.U4p;
    warndlg('La tensión de la red supera a la tensión nominal del
transformador 4.', 'Advertencia')
end

if v_conec == [0 0 0 0];
    warndlg('No se ha conectado ningún transformador.', 'Advertencia')
end

% ===== FIN ADVERTENCIAS ===== %

S_NT1 = handles.SNT1*handles.Uprim / handles.U1p;
S_NT2 = handles.SNT2*handles.Uprim / handles.U2p;
S_NT3 = handles.SNT3*handles.Uprim / handles.U3p;
S_NT4 = handles.SNT4*handles.Uprim / handles.U4p;

v_S_NT = [S_NT1 S_NT2 S_NT3 S_NT4].*v_conec;

S_NG = sum(v_conec.*v_S_NT)

Uz1 = handles.Uz1*handles.U1p / handles.Uprim;
Uz2 = handles.Uz2*handles.U2p / handles.Uprim;
Uz3 = handles.Uz3*handles.U3p / handles.Uprim;
Uz4 = handles.Uz4*handles.U4p / handles.Uprim;

v_Uz = [Uz1 Uz2 Uz3 Uz4]

UzG = S_NG / sum((v_S_NT./v_Uz).*v_conec)
```

Trabajo de Fin de Grado (TFG): Diseño de una aplicación software para el cálculo del acoplamiento en paralelo de transformadores.

```
set(handles.Uz_G,'String',[num2str(UzG),' %']);
set(handles.S_NG,'String',[num2str(S_NG),' kVA']);

for j=1:4;
    v_ST(j) =
0.001*(handles.carga*1000*v_S_NT(j)*1000*UzG)/(S_NG*1000*v_Uz(j));
    i_T(j) = v_ST(j)/v_S_NT(j);
end

[imax imax_pos] = max(i_T);
S_max = S_NG * v_Uz(imax_pos) / UzG;

set(handles.rep1,'String',[num2str(v_ST(1)),' kVA']);
set(handles.rep2,'String',[num2str(v_ST(2)),' kVA']);
set(handles.rep3,'String',[num2str(v_ST(3)),' kVA']);
set(handles.rep4,'String',[num2str(v_ST(4)),' kVA']);

set(handles.icarga1,'String',num2str(i_T(1)));
set(handles.icarga2,'String',num2str(i_T(2)));
set(handles.icarga3,'String',num2str(i_T(3)));
set(handles.icarga4,'String',num2str(i_T(4)));

set(handles.S_G_max,'String',[num2str(S_max),' kVA']);

handles.i_carga = i_T(1);

% ===== AVISOS DE SOBRECARGAS ===== %

if i_T(1) > 1;
    set(handles.sobrecarga1,'String','SOBRECARGADO');
elseif i_T(1) <= 1
    set(handles.sobrecarga1,'String','');
end
if i_T(2) > 1;
    set(handles.sobrecarga2,'String','SOBRECARGADO');
elseif i_T(2) <= 1
    set(handles.sobrecarga2,'String','');
end
if i_T(3) > 1;
    set(handles.sobrecarga3,'String','SOBRECARGADO');
elseif i_T(3) <= 1
    set(handles.sobrecarga3,'String','');
end
if i_T(4) > 1;
    set(handles.sobrecarga4,'String','SOBRECARGADO');
elseif i_T(4) <= 1
    set(handles.sobrecarga4,'String','');
end

guidata(hObject,handles);

function cos_phi_Callback(hObject, eventdata, handles)

cosphi = get(hObject,'String');
cosphi = str2num(cosphi);
```

Trabajo de Fin de Grado (TFG): Diseño de una aplicación software para el cálculo del acoplamiento en paralelo de transformadores.

```
handles.cosphi = cosphi;
guidata(hObject,handles);

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function cos_phi_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)

if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function phi_e_Callback(hObject, eventdata, handles)

phi_e = get(hObject,'String');
phi_e = str2num(phi_e);
handles.phie = phi_e;
guidata(hObject,handles);

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function phi_e_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)

if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

% ===== CÁLCULO DE LA CAÍDA DE TENSIÓN ===== %

function Calcular_caida_Callback(hObject, eventdata, handles)

SNT1 = handles.SNT1;
U1p = handles.U1p;

phie = degtorad(handles.phie);

cos_phie = cos(phie);
sin_phie = sin(phie);

u_r = cos_phie*handles.Uz1;
u_x = sin_phie*handles.Uz1;

i_1 = handles.i_carga;

cosphi = abs(handles.cosphi);
senphi = (1-handles.cosphi^2)^0.5

indcap = get(handles.indcap,'SelectedObject')
ind_cap = get(indcap,'String')

if strcmp(ind_cap,'Inductiva');
    senphi = senphi;
elseif strcmp(ind_cap,'Capacitiva');
    senphi = - senphi;
end
```

Trabajo de Fin de Grado (TFG): Diseño de una aplicación software para el cálculo del acoplamiento en paralelo de transformadores.

```
senphi
```

```
u_caida=i_1*(u_r*cosphi+u_x*senphi)+((i_1^2)/200)*(u_x*cosphi-  
u_r*senphi)^2
```

```
set(handles.Ucaida,'String',[num2str(u_caida),' %']);
```

```
u_2 = handles.U1s*(1-u_caida/100)
```

```
set(handles.Usalida,'String',[num2str(u_2),' V']);
```

```
guidata(hObject,handles);
```