

Trabajo Fin de Grado  
Ingeniería de Tecnologías Industriales

Análisis de Pérdidas de Transformadores en Modelos  
Monofásicos y Trifásicos

Autor: María del Carmen Pozo Gómez

Tutor: Antonio de la Villa Jaén

Dpto. Ingeniería Eléctrica  
Escuela Técnica Superior de Ingeniería  
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2021





Trabajo Fin de Grado  
Ingeniería de Tecnologías Industriales

# **Análisis de Pérdidas de Transformadores en Modelos Monofásicos y Trifásicos**

Autor:

María del Carmen Pozo Gómez

Tutor:

Antonio de la Villa Jaén

Profesor titular

Dpto. de Ingeniería Eléctrica  
Escuela Técnica Superior de Ingeniería  
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2021



Trabajo Fin de Grado: Análisis de Pérdidas de Transformadores en Modelos Monofásicos y Trifásicos

Autor: María del Carmen Pozo Gómez

Tutor: Antonio de la Villa Jaén

El tribunal nombrado para juzgar el Proyecto arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2021

El Secretario del Tribunal

*A mi familia*

*A mis maestros*

*A Lola*





# Agradecimientos

---

En primer lugar, quiero agradecer a mis padres su amor infinito, sin ellos no podría haber llegado hasta aquí.

A mi hermana, por ser un apoyo incondicional y cuidarme siempre.

A José Andrés, mi compañero de vida, por confiar en mí e inspirarme cada día.

A mi tutor, Antonio de la Villa, por ser un referente y ofrecerme esta oportunidad.

*María del Carmen Pozo Gómez*

*Sevilla, 2021*



# Resumen

---

En este proyecto se realizará un análisis de las pérdidas de transformadores al considerar un modelo monofásico equivalente frente a un modelo trifásico. Para ello, se dispone de un algoritmo de estimación de estados que emplea un modelo trifásico de transformador, todo ello, diseñado en Matlab. Se estudiarán las pérdidas obtenidas en cada modelo, ensayando diferentes escenarios planificados, con el objetivo final de evaluar la diferencia entre las pérdidas de ambos modelos de transformador.



# Abstract

---

In this project, an analysis of transformer losses will be developed, considering an equivalent single phase model versus a three-phase model. For this purpose, a state estimation algorithm is available, it uses a three-phase transformer model, all of this has been designed on Matlab. The losses obtained in each model will be studied, testing different planned scenarios, with the final objective of evaluating the difference between the losses of both transformer models.

# Índice

---

<b>Agradecimientos</b>	<b>ix</b>
<b>Resumen</b>	<b>xi</b>
<b>Abstract</b>	<b>xiii</b>
<b>Índice</b>	<b>xiv</b>
<b>Índice de Tablas</b>	<b>xvi</b>
<b>Índice de Figuras</b>	<b>xviii</b>
<b>Notación</b>	<b>xx</b>
<b>1 Introducción</b>	<b>1</b>
1.1 <i>Transformador real empleado en el estudio</i>	2
<b>2 Evaluación de pérdidas en transformadores monofásicos</b>	<b>3</b>
2.1 <i>Herramienta para construir el modelo monofásico del transformador</i>	3
2.2 <i>Aplicación de reparto de cargas en transformadores monofásicos</i>	5
<b>3 Evaluación de pérdidas en transformadores trifásicos</b>	<b>7</b>
3.1 <i>Herramienta para construir el modelo trifásico del transformador</i>	7
3.2 <i>Aplicación de reparto de cargas en transformadores trifásicos</i>	11
3.3 <i>Modelo trifásico en condiciones de equilibrio</i>	13
3.4 <i>Modelos trifásico/monofásico en condiciones de desequilibrio</i>	14
<b>4 Definición de escenarios</b>	<b>19</b>
4.1 <i>Escenarios del modelo monofásico del transformador</i>	20
4.2 <i>Escenarios del modelo trifásico del transformador</i>	21
4.2.1 <i>Escenarios trifásicos equilibrados</i>	21
4.2.2 <i>Escenarios trifásicos desequilibrados</i>	22
<b>5 Evaluación de simulaciones</b>	<b>25</b>
5.1 <i>Evaluación del modelo monofásico</i>	25
5.2 <i>Evaluación del modelo trifásico</i>	28
5.2.1 <i>Evaluación de las simulaciones en escenarios trifásicos equilibrados</i>	28
5.2.2 <i>Evaluación de las simulaciones en escenarios trifásicos desequilibrados</i>	29
<b>6 Análisis de resultados</b>	<b>37</b>
<b>7 Validación del modelo de transformador</b>	<b>49</b>
<b>8 Conclusiones</b>	<b>51</b>
8.1 <i>Posibilidades de mejora</i>	51
<b>Referencias</b>	<b>53</b>
<b>Anexos</b>	<b>55</b>



# ÍNDICE DE TABLAS

---

Tabla 1–1. Características del transformador. Elaboración propia.	2
Tabla 2–1. Parámetros del circuito equivalente aproximado del transformador. Elaboración propia.	4
Tabla 3–1. Comparación de las pérdidas del modelo trifásico en condiciones de equilibrio con su equivalente monofásico.	13
Tabla 4–1. Escenarios trifásicos en condiciones de desequilibrio tipo 1 con $S_C = 1$ pu. Elaboración propia.	22
Tabla 4–2. Escenarios trifásicos en condiciones de desequilibrio tipo 2 con $S_C = 1$ pu. Elaboración propia.	23
Tabla 4–3. Ejemplos de escenarios trifásicos en condiciones de desequilibrio tipo 3 con $S_C = 1$ pu. Elaboración propia.	23
Tabla 5–1. Pérdidas de potencia activa para los diferentes escenarios con $S_C = 0,63$ pu. Elaboración propia.	25
Tabla 5–2. Resultados obtenidos para los diferentes escenarios equilibrados con $S_C = 1$ pu. Elaboración propia.	28
Tabla 5–3. Resultados obtenidos para los diferentes escenarios desequilibrados con $S_C = 0,63$ pu. Elaboración propia.	29
Tabla 5–4. Resultados obtenidos para los diferentes escenarios con tensiones desequilibradas. Elaboración propia.	31
Tabla 5–5. Resultados obtenidos en escenarios con desequilibrios de tipo 3. Elaboración propia.	34
Tabla 6–1. Error en pérdidas de potencia activa para escenarios equilibrados con f.d.p. igual a 1. Elaboración propia.	37
Tabla 6–2. Error en pérdidas de potencia reactiva para escenarios equilibrados $S_C$ igual a 1 MVA. Elaboración propia.	38
Tabla 6–3. Error en pérdidas de potencia para escenarios desequilibrados con $S_C$ igual a 0,63 MVA y f.d.p. igual a la unidad. Elaboración propia.	39
Tabla 7–1. Ensayo de vacío realizado en el laboratorio de alta tensión.	49





# ÍNDICE DE FIGURAS

---

Figura 1-1. Esquema básico de funcionamiento del sistema eléctrico español [1].	1
Figura 2-1. Relación de transformaciones matemáticas aplicadas a las diferentes variables eléctricas del transformador. Elaboración propia.	3
Figura 2-2. Circuito equivalente aproximado del transformador. Elaboración propia.	4
Figura 2-3. Esquema unifilar del transformador. Elaboración propia.	5
Figura 3-1. Esquema de transformador trifásico [5].	7
Figura 3-2. Circuito del transformador estrella-triángulo con relaciones de tensión y corriente para la matriz de conexión. Elaboración propia.	9
Figura 3-3. Código de un escenario trifásico de ejemplo. Elaboración propia.	11
Figura 3-4. Resultados obtenidos tras la ejecución del programa raíz. Elaboración propia.	12
Figura 3-5. Construcción de un escenario monofásico a partir de un escenario trifásico desequilibrado. Elaboración propia.	14
Figura 3-6. Descomposición de un sistema trifásico desequilibrado en tres sistemas trifásicos equilibrados [8].	15
Figura 4-1. Esquema unificar. Construcción de escenarios. Elaboración propia.	19
Figura 4-2. Ejemplo de escenario monofásico. Elaboración propia.	20
Figura 4-3. Esquema de los distintos escenarios para un valor de potencia de carga $S_C = 1$ pu. Elaboración propia.	21
Figura 5-1. Gráfica de pérdidas de potencia activa en el transformador frente a la potencia de carga aparente con diferentes factores de potencia. Elaboración propia.	26
Figura 5-2. Gráfica de pérdidas de potencia activa en el transformador frente a la potencia de carga aparente para diferentes tensiones del nudo slack con $\cos(\varphi) = 1$ . Elaboración propia.	27
Figura 5-3. Gráfica de pérdidas de potencia activa frente a nivel de desequilibrio. Elaboración propia.	30
Figura 5-4. Gráfica de pérdidas de potencia reactiva frente a nivel de desequilibrio. Elaboración propia.	30
Figura 5-5. Gráfica de pérdidas de potencia activa para escenarios con un 5% de desequilibrio de tensión con respecto a la fase central. Elaboración propia.	32
Figura 5-6. Gráfica de pérdidas de potencia reactiva para escenarios con un 5% de desequilibrio de tensión con respecto a la fase central. Elaboración propia.	32
Figura 5-7. Gráfica de pérdidas de potencia activa en el transformador en dos situaciones de desequilibrio diferentes. Elaboración propia.	33
Figura 5-8. Gráfica del error en tensión entre las fases del nudo 2 provocadas por el desequilibrio del f.d.p. para diferentes niveles de tensión y potencia de carga. Elaboración propia.	35
Figura 6-1. Gráfica de la evolución del error en potencia activa para diferentes potencias de carga. Elaboración propia.	40

Figura 6-2. Gráfica de la evolución del error en potencia reactiva para diferentes potencias de carga. Elaboración propia.	40
Figura 6-3. Diagrama de barras de los errores en pérdidas de potencia activa para distintos niveles de carga. Elaboración propia.	41
Figura 6-4. Diagrama de barras de los errores en pérdidas de potencia activa (en porcentaje) para distintos niveles de carga. Elaboración propia.	42
Figura 6-5. Diagrama de barras de los errores en pérdidas de potencia reactiva (en porcentaje) para distintos niveles de carga. Elaboración propia.	43
Figura 6-6. Diagrama de barras de los errores en pérdidas de potencia para distintos niveles de carga. Elaboración propia.	44
Figura 6-7. Diagrama que compara los errores en pérdidas en función de si la tensión del nudo slack del escenario monofásico es exacta o aproximada. Elaboración propia.	45
Figura 6-8. Diagrama que compara el desequilibrio de tensión entre las fases del nudo 2 para distintas tensiones del nudo slack. Elaboración propia.	46
Figura 6-9. Gráfica de la evolución del error en las pérdidas de potencia para una tensión nominal. Elaboración propia.	47
Figura 7-1. Ciclo de histéresis o magnetización [9].	49

# Notación

---

$\cos(\varphi)$	Factor de potencia. Coseno del ángulo formado entre la potencia activa y la potencia aparente
f.d.p.	Factor de potencia
$\varphi$	Phi
$\Omega$	Omhio. Unidad derivada de resistencia eléctrica en el Sistema Internacional
pu	En por unidad
$P_{Fe}$	Pérdidas en el hierro del transformador
$P_{Cu}$	Pérdidas en el cobre del transformador
$S_C$	Potencia aparente de la carga
$V_1$	Tensión del nudo 1
$V_2$	Tensión del nudo 2
$V_{1(X)}$	Tensión de la fase X del nudo 1
$V_{2(X)}$	Tensión de la fase X del nudo 2
$S_C$	Potencia aparente de la carga
$R_{Fe}$	Resistencia de la rama de magnetización del circuito equivalente del transformador
$X_\mu$	Reactancia de la rama de magnetización del circuito equivalente del transformador
$R_{CC}$	Resistencia de cortocircuito del circuito equivalente del transformador
$X_{CC}$	Reactancia de cortocircuito del circuito equivalente del transformador

# 1 INTRODUCCIÓN

El sistema eléctrico español, como puede observarse en la *Figura 1-1*, se organiza en tres grandes sectores: sistema de generación, de transporte y, por último, de distribución [1]. En la red de transporte se asume que el sistema está equilibrado, pues la generación y las cargas son trifásicas equilibradas. Sin embargo, no ocurre lo mismo en la red de distribución, que sufre importantes desequilibrios como consecuencia de la distribución desigual de las cargas monofásicas en baja tensión.

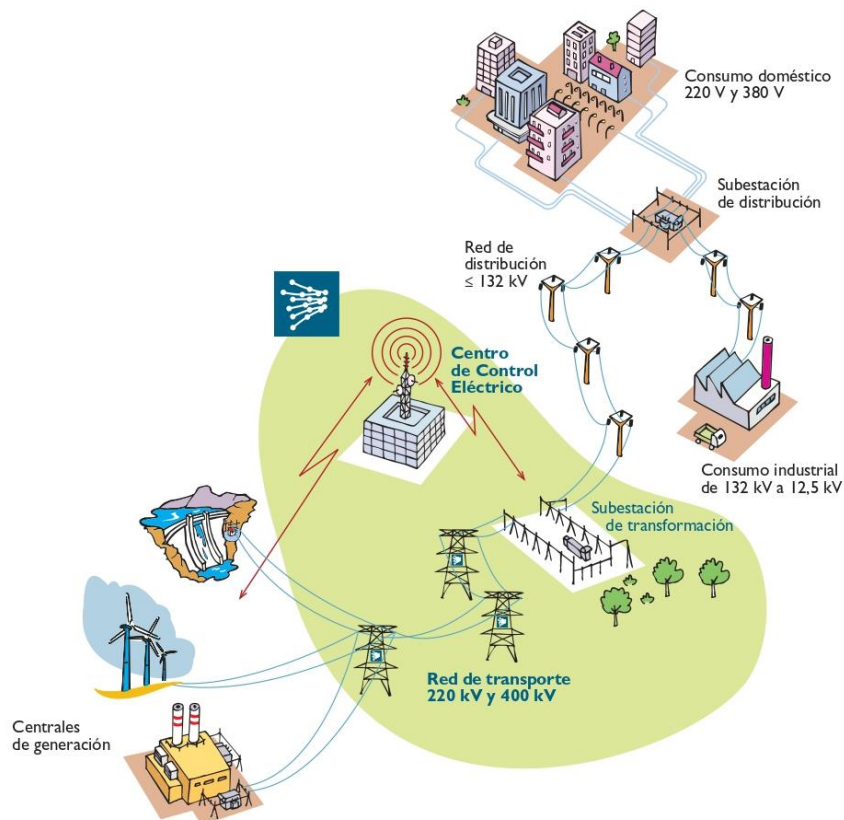


Figura 1-1. Esquema básico de funcionamiento del sistema eléctrico español [1].

Estos desequilibrios en la red de distribución afectan directamente a los transformadores, pues al ser sometidos a cargas desequilibradas presentan desequilibrios en sus magnitudes eléctricas. Según los resultados que arroja un estudio de CIGRÉ (Consejo Internacional de Grandes Redes Eléctricas) [2], donde se consideran redes tipo para simular cómo afectan fuentes distribuidas de energía renovable en la red de media y baja tensión, se contemplan fuertes desequilibrios en la red que hacen que circule intensidades relevantes por el neutro.

Actualmente, en la red de transporte se emplea el modelo monofásico de transformador equivalente que representa a un transformador equilibrado. Pero, esta simplificación que también se asume en la red de distribución puede alejarse de la realidad debido a los desequilibrios de la red. Aplicar un modelo monofásico en vez de un modelo trifásico podría suponer asumir ciertos errores en las magnitudes eléctricas, concretamente en las pérdidas del transformador.

Luego, queda justificada la necesidad de investigar cuánto error se comete implantando el modelo de transformador monofásico (que representa a un transformador equilibrado) frente al modelo trifásico de transformador en redes de distribución desequilibradas.

El objetivo final de este trabajo es obtener los errores de pérdidas de potencia entre ambos modelos del transformador mediante un programa de Matlab facilitado por el Departamento de Ingeniería Eléctrica. Para ello, el estudio se ha organizado del siguiente modo:

- Se definen los escenarios para el modelo monofásico del transformador, se simulan y se obtienen las pérdidas en cada uno de ellos.
- Se definen los escenarios trifásicos equilibrados para el modelo trifásico del transformador y se simulan, obteniendo las pérdidas en cada escenario.
- Se comparan los resultados anteriores, las pérdidas del modelo monofásico con las pérdidas del modelo trifásico en escenarios equilibrados, validando así el modelo del transformador.
- Se definen los escenarios trifásicos desequilibrados para el modelo trifásico del transformador y se obtiene tanto las pérdidas como el modelo equivalente monofásico. Después, se comparan las pérdidas de ambos modelos nuevamente, y se obtienen los resultados que arrojan las conclusiones de este trabajo.

Cabe destacar que para este estudio se han considerado modelos de transformador de parámetros constantes. Es decir, no entra en el alcance estudiar los modelos del transformador con ramas de magnetización con impedancia variable ni se considera la variación de la resistencia de los devanados con la temperatura.

## 1.1 Transformador real empleado en el estudio

Para realizar los ensayos en Matlab con los diferentes modelos de transformador, se ha considerado un transformador trifásico real acorde a las normas de la compañía distribuidora de la región [3]. A continuación, en la *Tabla 1-1* se muestran las características eléctricas del transformador en cuestión:

Tabla 1–1. Características del transformador. Elaboración propia.

CARACTERÍSTICAS DEL TRANSFORMADOR	
Potencia nominal trifásica del transformador	630 kVA
Tensión nominal de línea del transformador en devanado de alta	20 kW
Tensión nominal de línea del transformador en devanado de baja	0,42 kW
Conexión	Yd
Grupo	1

# 2 EVALUACIÓN DE PÉRDIDAS EN TRANSFORMADORES MONOFÁSICOS

A continuación, se detalla cómo se ha realizado el estudio de las pérdidas del modelo monofásico del transformador, así como también las herramientas que han sido facilitadas para poder llevarlo a cabo.

## 2.1 Herramienta para construir el modelo monofásico del transformador

En este apartado se trata la sustitución del transformador trifásico por un circuito equivalente monofásico simplificado, que incorpora todos los fenómenos físicos que se producen en la máquina real. Esta simplificación hace posible la aplicación del potencial de la teoría de redes eléctricas para conocer con antelación la respuesta del transformador ante unas condiciones determinadas de funcionamiento.

	VARIABLES ELÉCTRICAS	RELACIONES	VARIABLES ELÉCTRICAS REDUCIDAS AL DEVANADO PRIMARIO
f.e.m	$\frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2} = m \rightarrow E_1 = mE_2$	$E'_2 = E_1 = mE_2$	$\frac{E_1}{E'_2} = \frac{N_1}{N'_2} = 1 \rightarrow E'_2 = E_1$
Tensiones	$\frac{V_1}{V_2} = m \rightarrow V_1 = mV_2$	$V'_2 = V_1 = mV_2$	$\frac{V_1}{V'_2} = \frac{N_1}{N'_2} = 1 \rightarrow V'_2 = V_1$
Corrientes	$S_2 = V_2 I_2$	$I'_2 = \frac{I_2}{m}$	$S_2 = V'_2 I'_2$
Resistencias	$P_2 = R_2 I_2^2$	$R'_2 = m^2 R_2$	$P_2 = R'_2 I'^2_2$
Reactancias	$Q_2 = X_2 I_2^2$	$X'_2 = m^2 X_2$	$Q_2 = X'_2 I'^2_2$
Impedancias	$Z_L = \frac{V_2}{I_2}$	$Z'_L = m^2 Z_L$	$Z'_L = \frac{V'_2}{I'_2}$

Figura 2-1. Relación de transformaciones matemáticas aplicadas a las diferentes variables eléctricas del transformador. Elaboración propia.

Primero, se han reducido ambos devanados al mismo nivel de tensión, en este caso se ha reducido el secundario al primario [4]. La *Figura 2-1* muestra cómo se ha realizado la reducción de los devanados. La primera columna agrupa algunas variables eléctricas utilizadas en el modelo de transformador y cuyos valores están relacionados con el nivel de tensión en el que se encuentran. En la segunda columna se han pasado estas magnitudes eléctricas al devanado secundario utilizando las relaciones matemáticas de la columna central.

Una vez establecida esta relación, el circuito equivalente del transformador reducido al primario queda de la siguiente manera (*Figura 2-2*):

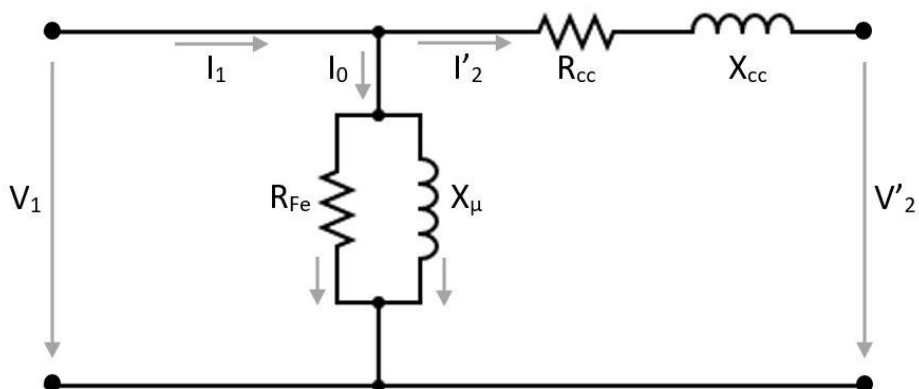


Figura 2-2. Circuito equivalente aproximado del transformador. Elaboración propia.

En la *Tabla 2-1* se dan los valores de los parámetros de cortocircuito y parámetros shunt del circuito equivalente aproximado del transformador visto en la figura anterior:

Tabla 2-1. Parámetros del circuito equivalente aproximado del transformador. Elaboración propia.

MODELO MONOFÁSICO EQUIVALENTE DEL TRANSFORMADOR	
$R_{cc}$	7,304 $\Omega$
$X_{cc}$	26,304 $\Omega$
$R_{Fe}$	316273 $\Omega$
$X_{\mu}$	54130 $\Omega$



## 2.2 Aplicación de reparto de cargas en transformadores monofásicos

En el apartado anterior se ha visto el modelo del transformador, sin embargo, para realizar el estudio se ha utilizado un programa de Matlab en el que este modelo ya está introducido. Este programa realiza una estimación de estados de un sistema eléctrico determinado, en este caso el sistema eléctrico que se va a estudiar está formado únicamente por el transformador. Es decir, se va a realizar el estudio de las pérdidas del transformador analizando un transformador como una red de dos nudos.

El nudo 1 del transformador es el lado de media tensión y el nudo 2 es el lado de baja tensión. Para realizar el flujo de cargas de esta red implementada se ha elegido como nudo slack el nudo del lado de media del transformador. En el programa informático se ha fijado la tensión del nudo slack, cuyos valores se detallarán en los siguientes apartados, y además, se ha fijado los valores de potencia de las cargas, es decir, se ha fijado la potencia (tanto activa como reactiva) en el nudo 2 del transformador (*Figura 2-3*).

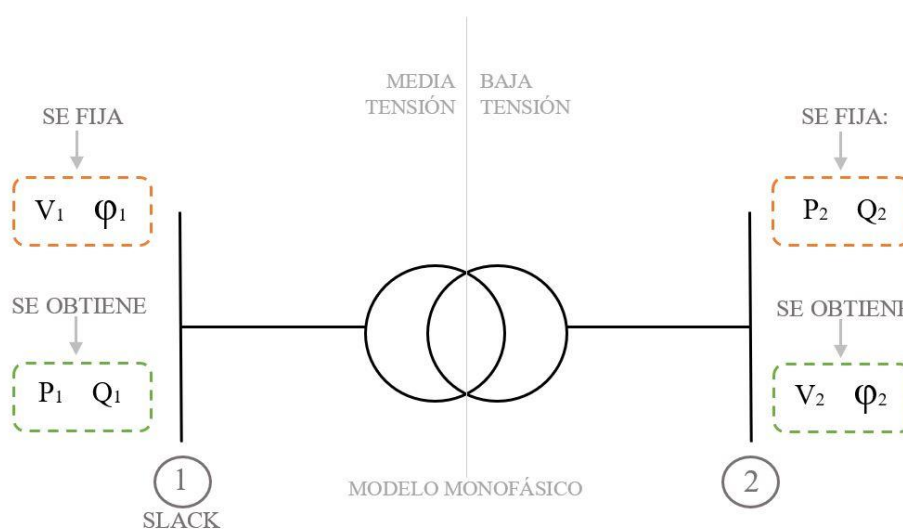


Figura 2-3. Esquema unifilar del transformador. Elaboración propia.

Al realizar el reparto de cargas, el programa devuelve las medidas de fase, tensión y potencia inyectada (activa y reactiva del nudo 2) de cada nudo. Luego, para calcular las pérdidas basta con hacer la diferencia de la potencia activa inyectada en cada uno.



# 3 EVALUACIÓN DE PÉRDIDAS EN TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS

A continuación, este apartado se muestra el modelo trifásico del transformador y las condiciones para su estudio.

## 3.1 Herramienta para construir el modelo trifásico del transformador

Para construir el modelo de transformador trifásico de dos devanados se considera este como una red acoplada de 12 terminales, con tres devanados primarios y tres secundarios acoplados entre sí mediante el núcleo del transformador (Figura 3-1). Los devanados 1, 3 y 5 son los primarios y los devanados 2, 4 y 6 son los secundarios. Cada devanado tiene un determinado acoplamiento con el resto de los devanados.

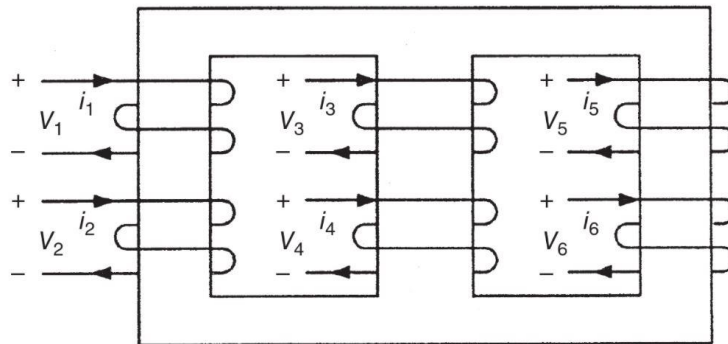


Figura 3-1. Esquema de transformador trifásico [5].

Para esta red, la matriz primitiva de cortocircuito se puede ver como (Ec. 3-1):

$$\begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \\ i_3 \\ i_4 \\ i_5 \\ i_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_{11} & y_{12} & y_{13} & y_{14} & y_{15} & y_{16} \\ y_{21} & y_{22} & y_{23} & y_{24} & y_{25} & y_{26} \\ y_{31} & y_{32} & y_{33} & y_{34} & y_{35} & y_{36} \\ y_{41} & y_{42} & y_{43} & y_{44} & y_{45} & y_{46} \\ y_{51} & y_{52} & y_{53} & y_{54} & y_{55} & y_{56} \\ y_{61} & y_{62} & y_{63} & y_{64} & y_{65} & y_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ v_3 \\ v_4 \\ v_5 \\ v_6 \end{bmatrix} \quad (3-1)$$

La matriz  $Y$  puede simplificarse aprovechando su simetría (Ec. 3-2):

$$\begin{pmatrix} y_p & -y_m & y'_m & y''_m & y'_m & y''_m \\ -y_m & y_s & y''_m & y'''_m & y''_m & y'''_m \\ y'_m & y''_m & y_p & -y_m & y'_m & y''_m \\ y''_m & y'''_m & -y_m & y_s & y''_m & y'''_m \\ y'_m & y''_m & y'_m & y''_m & y_p & -y_m \\ y''_m & y'''_m & y''_m & y'''_m & -y_m & y_s \end{pmatrix} \quad (3-2)$$

Los elementos  $y'$ ,  $y''$  e  $y'''$  son nulos si no hay acoplamientos mutuos, como por ejemplo el caso de un banco de tres transformadores monofásicos (Ec. 3-3).

$$\begin{pmatrix} i_1 \\ i_2 \\ i_3 \\ i_4 \\ i_5 \\ i_6 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} y_p & -y_m & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -y_m & y_s & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & y_p & -y_m & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -y_m & y_s & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & y_p & -y_m \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -y_m & y_s \end{pmatrix} \begin{pmatrix} v_1 \\ v_2 \\ v_3 \\ v_4 \\ v_5 \\ v_6 \end{pmatrix} \quad (3-3)$$

Se considera un transformador trifásico de conexión Yd1 (*Figura 3-2*) cuyas tensiones de rama y de nodo están relacionadas en la siguiente matriz de conexión (Ec. 3-4):

$$\begin{pmatrix} v_1 \\ v_2 \\ v_3 \\ v_4 \\ v_5 \\ v_6 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \\ V_A \\ V_B \\ V_C \end{pmatrix} \quad (3-4)$$

Para obtener la matriz de admitancia del nodo se aplica la transformación de Kron a la matriz de conexión  $\bar{N}$ , (Ec. 3-5):

$$\bar{Y}_{node} = \bar{N}^t \bar{Y}_{node} \bar{N} \quad (3-5)$$

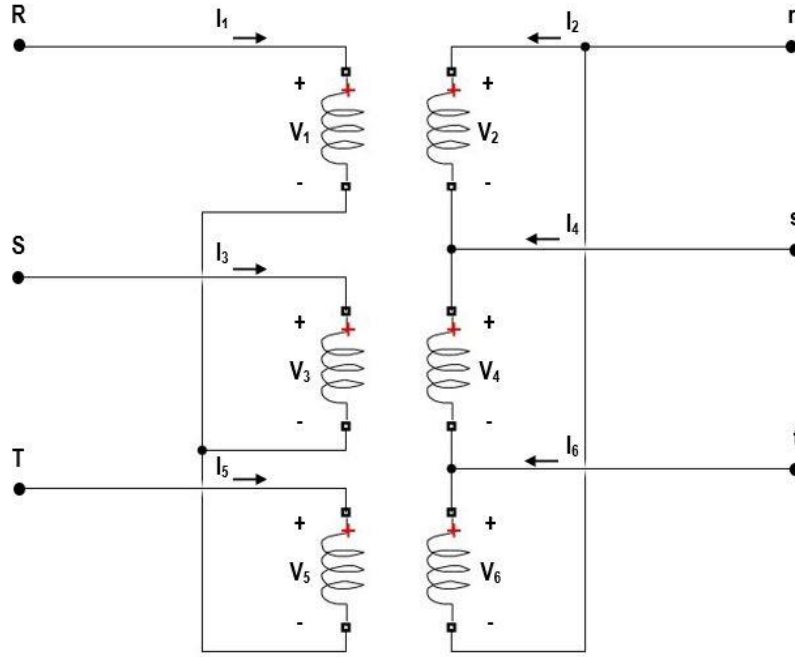


Figura 3-2. Circuito del transformador estrella-triángulo con relaciones de tensión y corriente para la matriz de conexión. Elaboración propia.

Luego, la matriz de admitancia nodal queda de la siguiente forma (Ec. 3-6):

$$\bar{Y}_{\text{node}} = \begin{pmatrix} y_s & y'_m & y'_m & -(y_m + y''_m) & (y'_m + y''_m) & 0 \\ y'_m & y_s & y'_m & 0 & -(y_m + y''_m) & (y_m + y''_m) \\ y'_m & y'_m & y_s & (y_m + y''_m) & 0 & -(y_m + y''_m) \\ -(y_m + y''_m) & 0 & (y_m + y''_m) & 2(y_s - y'''_m) & -(y_s - y'''_m) & -(y_s - y'''_m) \\ (y_m + y''_m) & -(y_m + y''_m) & 0 & -(y_s - y'''_m) & 2(y_s - y'''_m) & -(y_s - y'''_m) \\ 0 & (y_m + y''_m) & -(y_m + y''_m) & -(y_s - y'''_m) & -(y_s - y'''_m) & 2(y_s - y'''_m) \end{pmatrix} \quad (3-6)$$

Al sustituir la matriz de admitancias primitivas del transformador trifásico en la ecuación (3-5) desaparecen los términos de  $y$  primadas. Entonces, como puede observarse en la ecuación (3-7), la matriz de admitancia de nodos puede dividirse en diferentes submatrices:

$$\bar{Y}_{\text{node}} = \begin{pmatrix} \bar{Y}_I & \bar{Y}_{II} \\ Y'_{II} & \bar{Y}_{III} \end{pmatrix} \quad (3-7)$$

Y, por último, a su vez cada submatriz de 3x3 depende de las conexiones del bobinado. A continuación, se detalla cómo se constituye cada una de ellas (Ec. 3-8):

$$\bar{Y}_I = \begin{vmatrix} y_t & 0 & 0 \\ 0 & y_t & 0 \\ 0 & 0 & y_t \end{vmatrix} \quad \bar{Y}_{II} = \frac{1}{3} \begin{vmatrix} 2y_t & -y_t & -y_t \\ -y_t & 2y_t & -y_t \\ -y_t & -y_t & 2y_t \end{vmatrix} \quad \bar{Y}_{III} = \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{vmatrix} -y_t & y_t & 0 \\ 0 & -y_t & y_t \\ y_t & 0 & -y_t \end{vmatrix} \quad (3-8)$$

## 3.2 Aplicación de reparto de cargas en transformadores trifásicos

Al igual que en el caso del modelo monofásico, en la configuración del programa de Matlab ya está introducido el modelo trifásico del transformador, solo se tiene que especificar en el programa qué modelo se emplea cuando se realizan las simulaciones.

La red a la que se le realiza el reparto de cargas sigue teniendo únicamente dos nudos, siendo el nudo de media tensión el nudo slack. La única diferencia con respecto a los resultados del anterior modelo es que en este caso hay tres fases en cada nudo.

Para realizar el estudio se tienen que construir diferentes escenarios (que se detallan en el apartado 4 de esta memoria) en los que se fija la tensión y la fase de un nudo (en este caso el nudo 1, nudo slack) y la potencia de la carga (tanto activa como reactiva del nudo 2). La distinción con respecto al modelo monofásico es que se tienen que especificar los valores para las tres fases en cada magnitud eléctrica que se defina.

En el *Ejemplo 3-1* se muestra un flujo de cargas para un determinado escenario del modelo de transformador trifásico:

---

### Ejemplo 3-1. Flujo de cargas de un escenario trifásico determinado.

*El objetivo es realizar un flujo de cargas de un escenario trifásico equilibrado con el programa de Matlab facilitado.*

*Primero, se debe definir el escenario. Esto es, se deben introducir en un archivo los valores de fase (“mmedfase”) y tensión (“mmedten”) de cada fase del nudo slack: la tensión es la misma para cada fase (1 pu) y los ángulos están desfasados entre sí 120° (en el programa se introducen en radianes). Por otro lado, se impone el valor de la potencia de carga en el nudo 2, tanto de potencia activa (“mmedinyp”) como de potencia reactiva (“mmedinyq”). El valor del  $\cos(\phi)$  impuesto es de 0’8, y al tratarse de un escenario equilibrado, el valor de la potencia activa para cada fase es 0’8 y el valor de la potencia reactiva para cada fase es 0’6. Estos datos se recogen en una extensión de archivo M, como se muestra en el código de la Figura 3-3.*

```
% Medidas para ensayar rutinas de Jacobiano
mmedfase=[
    1    -0*pi/180    0.0040    1
    1   -120*pi/180    0.0040    2
    1    120*pi/180    0.0040    3
    1   -0.0000000    0.0040    4
    2   -0.0000000    0.0040    4
];
mmedten=[
    1    0    0.0040    4
    1    1    0.0040    1
    1    1    0.0040    2
    1    1    0.0040    3
    2    0    0.0040    4
];
mmedinyp=[
    2   -0.8    0.0291    1
    2   -0.8    0.0291    2
    2   -0.8    0.0291    3
    2    0     0.0291    4
    2    0     0.0291    4
];
mmedinyq=[
    2   -0.6    0.01460000    1
    2   -0.6    0.01460000    2
    2   -0.6    0.01460000    3
    2    0     0.01460000    4
];
```

Figura 3-3. Código de un escenario trifásico de ejemplo. Elaboración propia.

Una vez configurado el archivo del escenario, este debe introducirse en el programa raíz para realizar finalmente el flujo de cargas de la red constituida por el transformador trifásico. Tras su compilación el programa nos devuelve si el resultado ha convergido o no, el número de iteraciones y otros datos relacionados con el método interno adoptado para las operaciones. Después, introducimos el comando “[Med\_comp]=Crea\_conj\_complet\_medidas\_V2(Red,Xe,cfg,0,'borrar',Med)” y se obtienen los resultados del flujo de cargas (Figura 3-4).

```

mmedfase =
  1  -1.0632e-20      0.004      1
  1   -2.0944        0.004      2
  1   2.0944         0.004      3
  1   0              0.004      4
  2   0.47935        0.004      1
  2  -1.615          0.004      2
  2   2.5737         0.004      3
  2 -5.4326e-37      0.004      4

mmedten =
  1   1      0.0053      1
  1   1      0.0053      2
  1   1      0.0053      3
  1   0      0.0053      4
  2  0.94159  0.0053      1
  2  0.94159  0.0053      2
  2  0.94159  0.0053      3
  2 -1.125e-19 0.0053      4

mmedinyp =
  1   0.82187      0.03      1
  1   0.82187      0.03      2
  1   0.82187      0.03      3
  1   0           0.03      4
  2  -0.8         0.03      1
  2  -0.8         0.03      2
  2  -0.8         0.03      3
  2  2.8889e-34   0.03      4

mmedinyq =
  1   0.68157      0.015      1
  1   0.68157      0.015      2
  1   0.68157      0.015      3
  1   0           0.015      4
  2  -0.6         0.015      1
  2  -0.6         0.015      2
  2  -0.6         0.015      3
  2 -1.9259e-34   0.015      4

mmedinyi =
  1   1.0677      0.48497      1
  1   1.0677      0.48497      2
  1   1.0677      0.48497      3
  1   0           0.48497      4
  2   1.062       0.010184      1
  2   1.062       0.010184      2
  2   1.062       0.010184      3
  2  2.5121e-15   0.010184      4

```

Figura 3-4. Resultados obtenidos tras la ejecución del programa raíz. Elaboración propia.



Como puede observarse en la figura anterior, se han obtenido los valores de fase, tensión, potencia activa inyectada y potencia reactiva inyectada en cada fase de cada nudo. Con estos resultados se realiza el estudio completo de este proyecto.

### 3.3 Modelo trifásico en condiciones de equilibrio

La primera parte del estudio de las pérdidas del transformador es verificar que cuando las cargas son equilibradas, las pérdidas obtenidas con el modelo trifásico son iguales a las obtenidas a su equivalente monofásico. De esta forma, se tiene constancia de que el modelo trifásico empleado es válido y que los resultados posteriores en los estudios desequilibrados serán fiables.

Tras realizar las simulaciones, cuyos resultados se verán con más detalle en los próximos apartados, se han obtenido las mismas pérdidas de potencia en cada modelo empleando los mismos escenarios para poder ser comparados.

Tabla 3–1. Comparación de las pérdidas del modelo trifásico en condiciones de equilibrio con su equivalente monofásico.

TRIFÁSICO EQUILIBRADO					MONOFÁSICO		
$V_{1(R)}$ (kV) <sup>***</sup>	$P_{2(R)}$ (kW) <sup>**</sup>	$P_{2(S)}$ (kW) <sup>**</sup>	$P_{2(T)}$ (kW) <sup>**</sup>	PERDIDAS TOTALES (kW)	$V_1$ (kV) <sup>***</sup>	$P_2$ (kW) <sup>*</sup>	PERDIDAS TOTALES (kW)
21	400	400	400	26,392	21	1200	26,392
	300	300	300	15,273		900	15,273
	200	200	200	7,4883		600	7,4883
	100	100	100	2,9003		300	2,9003
20	400	400	400	28,981	20	1200	28,981
	300	300	300	16,626		900	16,626
	200	200	200	7,9996		600	7,9996
	100	100	100	2,927		300	2,927
19	400	400	400	32,061	19	1200	32,061
	300	300	300	18,242		900	18,242
	200	200	200	8,6253		600	8,6253
	100	100	100	2,9859		300	2,9859
* Potencia base empleada en el caso monofásico: $S_{3B} = 1000000$ VA							
** Potencia base empleada en el caso trifásico: $S_{1B} = 1000000/3$ VA							
*** Tensión base trifásica: $U_{3B} = 20$ kV							

En la *Tabla 3-1* se han mostrado los resultados que se han obtenido en unos escenarios seleccionados para hacer la comparación entre los modelos del transformador. Para ambos modelos el factor de potencia es la unidad, por esa razón sólo se detalla la potencia activa de la carga. Se han tomado diferentes niveles de tensión (con sobretensión, tensión nominal y subtensión) y diferentes niveles de potencia de carga (90% y 40% de sobrecarga, carga nominal y carga del 50%, aproximadamente). Para el modelo trifásico se ha impuesto la misma tensión en cada fase del nudo 1 y desfasadas  $120^\circ$  entre sí ( $0^\circ$ ,  $-120^\circ$  y  $120^\circ$ , respectivamente para cada fase). Para poder realizar la comparación entre ambos modelos, en el modelo monofásico se ha impuesto la misma tensión con  $0^\circ$  y con una carga igual a la suma de la carga de cada fase del modelo trifásico. Finalmente, como puede observarse, las pérdidas totales de potencia son exactamente iguales en las simulaciones de ambos modelos.

### 3.4 Modelos trifásico/monofásico en condiciones de desequilibrio

Como se hizo referencia en la introducción de este trabajo, este estudio surge de las evidencias que existen de corrientes considerables que circulan por el neutro del transformador cuando hay condiciones de desequilibrio en las cargas. Pero, para poder saber cómo afectan ciertas condiciones de desequilibrio de carga al transformador y obtener el error en las pérdidas de potencia, se necesita poder comparar el modelo usado en la actualidad (el modelo monofásico del transformador) con el modelo que se quiere introducir para mejorar las estimaciones de las pérdidas (modelo trifásico del transformador). En este apartado se va a tratar esta comparación.

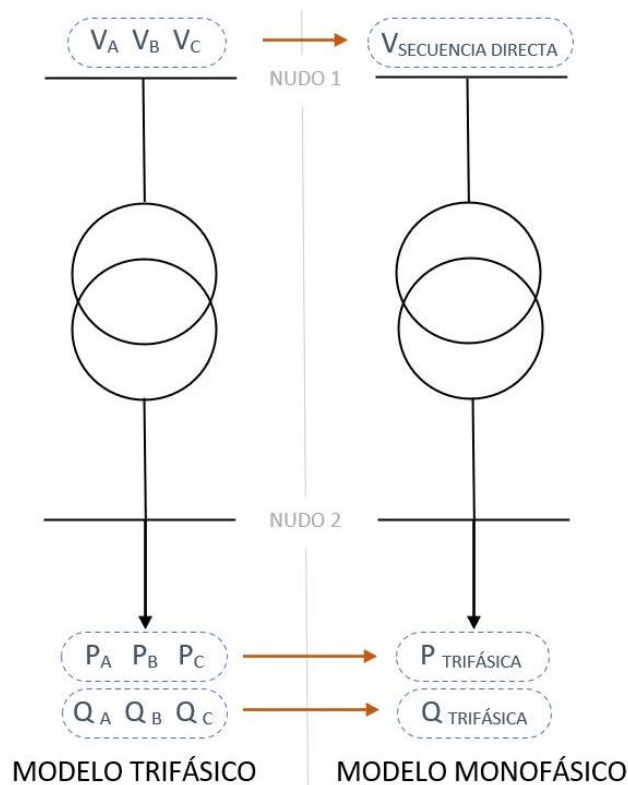


Figura 3-5. Construcción de un escenario monofásico a partir de un escenario trifásico desequilibrado. Elaboración propia.

Primero se deben construir los escenarios trifásicos desequilibrados correspondientes, que serán detallados en el apartado 4. Para ello, se distinguen dos tipos de condiciones de desequilibrio:

- Condiciones de desequilibrio tipo 1: Se fija la tensión del nudo slack con el mismo módulo, pero cada fase desfasada  $120^\circ$  con el resto. Y se impone una carga trifásica desequilibrada, es decir, una carga diferente en las fases del nudo 2. Se simula con un factor de potencia igual en cada fase y con un factor de potencia diferente entre fases.
- Condiciones de desequilibrio tipo 2: Se impone una tensión desequilibrada en el nudo 1 módulo diferente en cada fase, pero manteniendo el desfase de  $120^\circ$  entre sí. Sin embargo, en estas condiciones, la carga del nudo 2 se impone de forma equilibrada (potencia de carga igual en las tres fases).

En ambos casos, para construir los escenarios monofásicos equivalentes, se sigue el esquema representado en la Figura 3-5.

La potencia de carga del escenario monofásico equivalente se corresponde con la potencia trifásica del escenario trifásico desequilibrado, es decir, la suma de la potencia de las fases del nudo 2 del escenario trifásico (ecuaciones 3-9 y 3-10). Para ello, se ha tomado una potencia base de 1 MVA para el caso monofásico y una potencia base de 1/3 MVA para el caso trifásico.

$$P_R + P_S + P_T = P_{TRIFASICA} \quad (3-9)$$

$$Q_R + Q_S + Q_T = Q_{TRIFASICA} \quad (3-10)$$

En los escenarios en condiciones de desequilibrio de tipo 1, la tensión en las tres fases tiene el mismo módulo y están desfasadas entre sí  $120^\circ$ . Luego, la tensión monofásica equivalente tendrá el mismo módulo y un ángulo de  $0^\circ$ . Sin embargo, en los escenarios en condiciones de desequilibrio de tipo 2, la tensión del nudo slack es desequilibrada. Para establecer la tensión del nudo slack de su escenario monofásico equivalente se debe aplicar el *teorema de las componentes simétricas* (expresión 3-11), que descompone la terna de tensiones desequilibradas en sus correspondientes tensiones de secuencia directa (1), inversa (2) y homopolar (0), (Figura 3-6). La secuencia directa tiene la misma secuencia de fases que el sistema original, está compuesta por tres fasores de igual amplitud separados  $120^\circ$  entre las fases. La secuencia inversa tiene una secuencia de fases contraria al sistema original y está compuesta por tres fasores de la misma amplitud desfasados  $120^\circ$ . Por último, la secuencia homopolar está compuesta por tres fasores con la misma fase y amplitud [7].

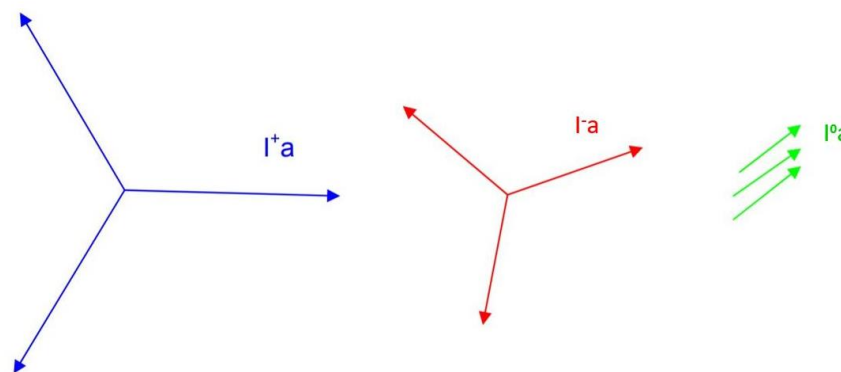


Figura 3-6. Descomposición de un sistema trifásico desequilibrado en tres sistemas trifásicos equilibrados [8].

Luego, las tensiones desequilibradas del nudo slack del escenario trifásico desequilibrado se pueden expresar de la siguiente forma:

$$\begin{bmatrix} \vec{V}_0 \\ \vec{V}_1 \\ \vec{V}_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \vec{V}_R \\ \vec{V}_S \\ \vec{V}_T \end{bmatrix} \text{ donde } a = 1 \angle 120^\circ \quad (3-11)$$

En el escenario monofásico equivalente, la tensión que se impone es la tensión de secuencia directa obtenida tras aplicar el teorema de las componentes simétricas a la terna de tensiones obtenida en el escenario trifásico desequilibrado.

A continuación, se exponen algunos ejemplos de la construcción del escenario monofásico a partir del escenario trifásico impuesto:

**Ejemplo 3-2.** Construcción de un escenario monofásico a partir de un escenario trifásico en condiciones de desequilibrio tipo I.

El escenario trifásico desequilibrado es el siguiente:

- La tensión del nudo slack, el nudo de media tensión, es equilibrada.

$$U_{1(R)} = 1 \angle 0^\circ \text{ (pu)} \quad U_{1(S)} = 1 \angle -120^\circ \text{ (pu)} \quad U_{1(T)} = 1 \angle 120^\circ \text{ (pu)}$$

- La potencia activa de la carga, del nudo de baja tensión, presenta un desequilibrio de 0,1 pu entre sus fases.

$$P_{2(R)} = 0,90 \text{ (pu)} \quad P_{2(S)} = 1 \text{ (pu)} \quad P_{2(T)} = 1,10 \text{ (pu)}$$

- La potencia reactiva de la carga es nula porque se ha impuesto un factor de potencia de la unidad.

$$Q_{2(R)} = 0 \text{ (pu)} \quad Q_{2(S)} = 0 \text{ (pu)} \quad Q_{2(T)} = 0 \text{ (pu)}$$

Como la tensión del nudo slack del escenario trifásico es equilibrada, la tensión del nudo slack del escenario monofásico, teniendo en cuenta que la tensión base es 20 kV, es:

$$U_1 = 1 \angle 0^\circ \text{ (pu)}$$

La potencia base del modelo trifásico es 1/3 MVA. Luego, la suma de las potencias activas de cada fase del nudo 2 del escenario trifásico será la potencia activa del nudo 2 del escenario monofásico equivalente:

$$P_{2(R)} = 300 \text{ kW} \quad P_{2(S)} = 333,333 \text{ kW} \quad P_{2(T)} = 366,666 \text{ kW}$$

$$P_{2(R)} + P_{2(S)} + P_{2(T)} = 1000 \text{ kW} = P_{2 \text{ (ESCENARIO MONOFÁSICO)}}$$

Y, lo mismo ocurre para la potencia reactiva:

$$Q_{2(R)} + Q_{2(S)} + Q_{2(T)} = 0 \text{ kW} = Q_{2 \text{ (ESCENARIO MONOFÁSICO)}}$$

**Ejemplo 3-3.** Construcción de un escenario monofásico a partir de un escenario trifásico en condiciones de desequilibrio tipo 2.

El escenario trifásico desequilibrado es el siguiente:

- La tensión del nudo slack presenta un desequilibrio de 0,05 pu entre sus fases.

$$U_{1(R)} = 0,95 \angle 0^\circ \text{ (pu)} \quad U_{1(S)} = 1 \angle -120^\circ \text{ (pu)} \quad U_{1(T)} = 1,05 \angle 120^\circ \text{ (pu)}$$

- Tanto la potencia activa como la reactiva del nudo 2, potencias de carga, son equilibradas.

$$\begin{aligned} P_{2(R)} &= 1 \text{ (pu)} & P_{2(S)} &= 1 \text{ (pu)} & P_{2(T)} &= 1 \text{ (pu)} \\ Q_{2(R)} &= 0 \text{ (pu)} & Q_{2(S)} &= 0 \text{ (pu)} & Q_{2(T)} &= 0 \text{ (pu)} \end{aligned}$$

Igual que en el ejemplo anterior, la potencia del modelo trifásico es 1/3 MVA. Luego, la potencia del escenario monofásico equivalente será:

$$\begin{aligned} P_{2(R)} &= 333,333 \text{ kW} & P_{2(S)} &= 333,333 \text{ kW} & P_{2(T)} &= 333,333 \text{ kW} \\ P_{2(R)} + P_{2(S)} + P_{2(T)} &= 1000 \text{ kW} = P_2 \text{ (ESCENARIO MONOFÁSICO)} \\ Q_{2(R)} + Q_{2(S)} + Q_{2(T)} &= 0 \text{ kW} = Q_2 \text{ (ESCENARIO MONOFÁSICO)} \end{aligned}$$

Sin embargo, para calcular la tensión del escenario monofásico equivalente no es tan inmediato como en el ejemplo anterior. Si no que hay que aplicar el teorema de las componentes simétricas:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \overrightarrow{V_{1(0)}} \\ \overrightarrow{V_{1(1)}} \\ \overrightarrow{V_{1(2)}} \end{bmatrix} &= \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \overrightarrow{V_{1(R)}} \\ \overrightarrow{V_{1(S)}} \\ \overrightarrow{V_{1(T)}} \end{bmatrix} \rightarrow \begin{bmatrix} \overrightarrow{V_{1(0)}} \\ \overrightarrow{V_{1(1)}} \\ \overrightarrow{V_{1(2)}} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1\angle 120^\circ & 1\angle 240^\circ \\ 1 & 1\angle 240^\circ & 1\angle 120^\circ \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0,95 \angle 0^\circ \\ 1 \angle -120^\circ \\ 1,05 \angle 120^\circ \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} \overrightarrow{V_{1(0)}} \\ \overrightarrow{V_{1(1)}} \\ \overrightarrow{V_{1(2)}} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 0,25 \angle 180^\circ \\ 0,9875 \angle 0,4187^\circ \\ 0,0144 \angle -150^\circ \end{bmatrix} \text{ (pu)} \end{aligned}$$

Luego, la tensión del nudo 1 del escenario monofásico equivalente es:

$$U_{1_{MONOFASICO}} = U_{1(directa)_{TRIFASICO}} = 0,9875 \angle 0,4187^\circ \text{ (pu)}$$



## 4 DEFINICIÓN DE ESCENARIOS

La definición de los escenarios es fundamental para obtener el enfoque adecuado en el estudio. Se han construido diferentes escenarios de cada modelo para extraer unos resultados que permitan realizar un análisis global de los casos que presentan condiciones más desfavorables al emplear un modelo monofásico y así, cuantificar el error en las pérdidas de potencia.

Para diseñar los diferentes escenarios, tanto del modelo monofásico como del modelo trifásico, se ha seguido el esquema mostrado en la *Figura 4-1*. Se han impuesto las siguientes actuaciones en el archivo de extensión M introducido en el programa raíz de Matlab:

- Fase de la tensión del nudo slack (nudo del lado de media tensión).
- Módulo de la tensión del nudo slack.
- Potencia activa de la carga del nudo 2 (nudo del lado de baja tensión).
- Potencia reactiva de la carga del nudo 2.

Tras ejecutar el programa facilitado con el escenario correspondiente, se obtienen las siguientes variables gracias al flujo de cargas realizado:

- Potencia activa inyectada en el nudo 1.
- Potencia reactiva inyectada en el nudo 1.
- Fase de la tensión del nudo 2.
- Módulo de la tensión del nudo 2.

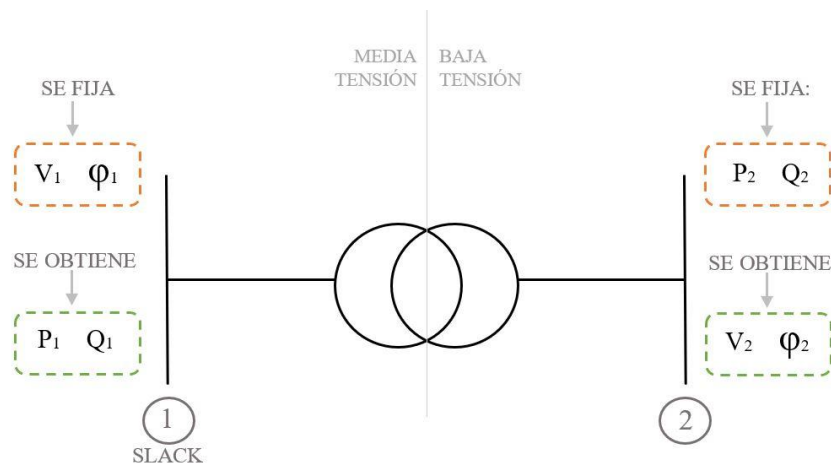
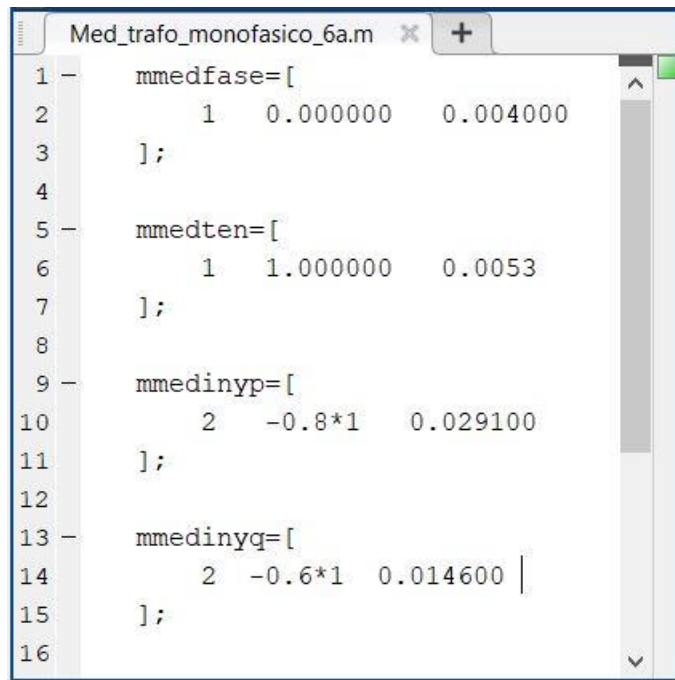


Figura 4-1. Esquema unificar. Construcción de escenarios. Elaboración propia.

Cabe destacar que todas las magnitudes son tratadas en por unidad (pu) y los ángulos, en radianes. Además, la potencia base es diferente para cada modelo, pero la tensión base es igual en ambos. Esta información se detalla en los siguientes subapartados.

En la *Figura 4-2* se muestra un escenario de ejemplo en Matlab, concretamente para un caso monofásico de  $S_C=1$  pu con  $\cos(\varphi)=0,8$  y tensión nominal en el nudo slack.



```

1 - mmedfase=[
2     1  0.000000  0.004000
3 ];
4
5 - mmedten=[
6     1  1.000000  0.0053
7 ];
8
9 - mmedinyp=[
10    2 -0.8*1  0.029100
11 ];
12
13 - mmedinyq=[
14    2 -0.6*1  0.014600
15 ];
16

```

Figura 4-2. Ejemplo de escenario monofásico. Elaboración propia.

#### 4.1 Escenarios del modelo monofásico del transformador

En el diseño de los escenarios se ha perseguido obtener un amplio abanico de situaciones para poder realizar un análisis general que abarque las condiciones más realistas posibles. Las actuaciones ejecutadas en los escenarios del modelo monofásico han sido las siguientes:

- Nivel de potencia aparente de la carga. Se han adoptado potencias de carga desde un 8% de carga hasta un 90% de carga con respecto al valor de carga nominal. La potencia base es 1 MVA en este modelo, luego, la potencia aparente nominal es 1 MVA.
- Nivel de tensión del nudo slack. Para cada valor de potencia aparente impuesta, se establecen tres niveles de tensión: tensión nominal (1 pu), subtensión (0,95 pu) y sobretensión (1,05 pu). Los niveles de subtensión y sobretensión se obtienen con un  $\pm 5\%$  de la tensión nominal, como la tensión base es 20 kV, los niveles de tensión quedan en 20 kV, 19 kV y 21 kV, respectivamente.
- Factor de potencia. Para cada valor de potencia aparente impuesta y cada nivel de tensión, se han establecido también diferentes niveles del factor de potencia:  $\cos(\varphi)=1$ ;  $\cos(\varphi)=0,98$ ;  $\cos(\varphi)=0,95$ ;  $\cos(\varphi)=0,9$ ;  $\cos(\varphi)=0,85$  y  $\cos(\varphi)=0,8$ . De esta forma queda establecida tanto la potencia activa como la reactiva del nudo 2.

Los escenarios construidos son el resultado de permutar las diferentes opciones con respecto a cada variable, obteniéndose así 234 escenarios cambiando las diferentes opciones de cada magnitud.



En la *Figura 4-3* se muestra un esquema de los diferentes escenarios para una potencia de carga  $S_C$  impuesta con el objetivo de esclarecer la explicación anterior. En resumen, por cada potencia de carga impuesta se construyen 18 escenarios que combinan los distintos niveles de tensión con los diferentes valores de factor de potencia.

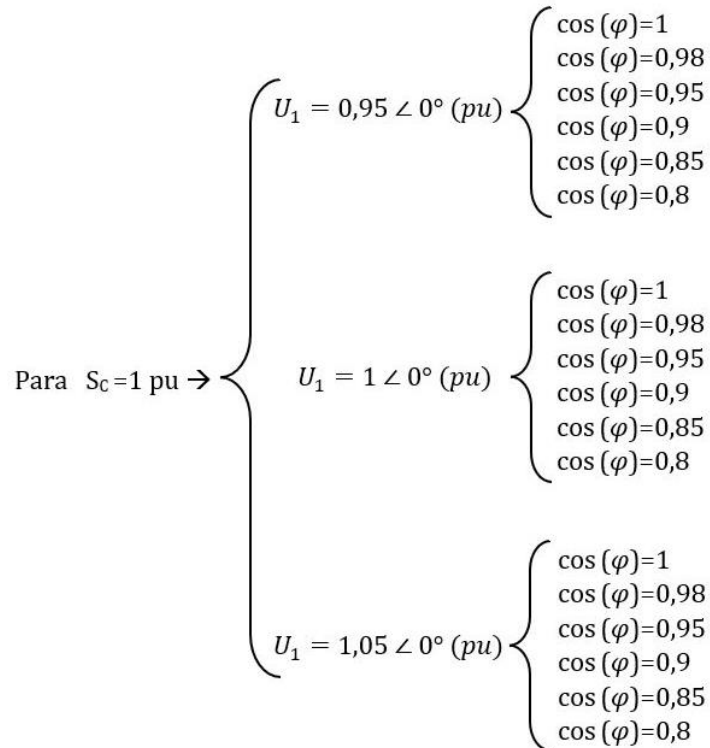


Figura 4-3. Esquema de los distintos escenarios para un valor de potencia de carga  $S_C = 1 \text{ pu}$ .  
Elaboración propia.

## 4.2 Escenarios del modelo trifásico del transformador

### 4.2.1 Escenarios trifásicos equilibrados

Para la construcción de los escenarios trifásicos equilibrados se ha seguido el mismo método que para los escenarios monofásicos. El resultado final es también un conjunto de 234 escenarios trifásicos equilibrados que combinan las distintas variables que se pueden fijar en el programa de Matlab.

La única diferencia con respecto a la definición de los escenarios monofásicos es que tanto las tensiones como las potencias deben introducirse para cada fase:

- La tensión del nudo slack impuesta es equilibrada: el módulo es igual en las tres fases y están desfasadas entre sí  $120^\circ$ .
- Tanto la potencia activa como reactiva tiene el mismo valor en las tres fases.

#### 4.2.2 Escenarios trifásicos desequilibrados

En la construcción de los escenarios trifásicos desequilibrados se han considerado diferentes condiciones de desequilibrio:

- Condiciones de desequilibrio tipo 1: Para cada nivel de potencia de carga  $S_C$  (desde el 8 % de carga hasta el 90% de sobrecarga con respecto a la carga nominal) se aplica un desequilibrio en la potencia de carga, con factor de potencia de unidad, que va desde un 0% hasta un 100% de desequilibrio entre las cargas. Por otro lado, la tensión impuesta en el nudo slack es la nominal (20 kV) con un desfase de  $120^\circ$  entre las fases.
- Condiciones de desequilibrio tipo 2: Para unos niveles de potencia de carga  $S_C$  seleccionados, la potencia del nudo 2 se mantiene equilibrada con un factor de potencia de unidad. Sin embargo, la tensión del nudo slack es desequilibrada: los módulos de la tensión presentan un desequilibrio desde el 0% hasta el 5%.
- Condiciones de desequilibrio tipo 3: Para cada nivel de potencia de carga  $S_C$  (desde el 20% de sobrecarga hasta el 5% de carga nominal) se aplican tres niveles de tensión (1 pu, 0,95 pu y 1,05 pu, teniendo en cuenta que la tensión base es 20 kV). En estas condiciones el desequilibrio aparece en el factor de potencia aplicado a las cargas: las fases S y T tienen  $\cos(\varphi)=1$  y la fase R tiene  $\cos(\varphi)=0,8$ .

En la *Tabla 4-1* se muestran los diferentes escenarios que se han construido para un nivel de potencia de carga  $S_C = 1$  pu, es decir,  $S_C = 1$  MVA. Se han considerado diferentes desequilibrios de cargas entre las fases: desde un desequilibrio nulo hasta un desequilibrio de 1 pu con respecto a la potencia de carga. Además, como puede observarse, el desequilibrio de la carga se da en las fases R y T con respecto a la fase central S, la cual mantiene la potencia de 333,33 kW constante en todos los escenarios.

Tabla 4–1. Escenarios trifásicos en condiciones de desequilibrio tipo 1 con  $S_C = 1$  pu. Elaboración propia.

Nº DE ESCENARIO	NIVEL DE DESEQUILIBRIO (pu)	P <sub>2</sub> (R) (pu)	P <sub>2</sub> (S) (pu)	P <sub>2</sub> (T) (pu)	Q <sub>2</sub> (R) (pu)	Q <sub>2</sub> (S) (pu)	Q <sub>2</sub> (T) (pu)
1	0	1	1	1	0	0	0
2	0,05	0,95	1	1,05	0	0	0
3	0,1	0,90	1	1,10	0	0	0
4	0,2	0,80	1	1,20	0	0	0
5	0,3	0,70	1	1,30	0	0	0
6	0,4	0,60	1	1,40	0	0	0
7	0,5	0,50	1	1,50	0	0	0
8	0,6	0,40	1	1,60	0	0	0
9	0,7	0,30	1	1,70	0	0	0
10	0,8	0,20	1	1,80	0	0	0
11	0,9	0,10	1	1,90	0	0	0
12	1	0	1	2	0	0	0
LA POTENCIA BASE PARA EL CASO TRIFÁSICO ES 1/3 MVA							
TENSIÓN EN EL NUDO SLACK: $V_{1(R)} = 1 \angle 0^\circ$ pu; $V_{1(S)} = 1 \angle -120^\circ$ pu y $V_{1(T)} = 1 \angle 120^\circ$ pu con $V_{base} = 20$ Kv							

En la Tabla 4-2 se han expuesto diferentes escenarios trifásicos en condiciones de desequilibrio nombrado como tipo 2, donde la potencia del nudo 2 se mantiene constante en cada uno de estos escenarios. Sin embargo, el desequilibrio se presenta en la tensión del nudo slack: la fase central se mantiene con la tensión nominal constante mientras que las otras dos fases son las que presentan un cierto desequilibrio con respecto a la central. Todo ello, para diferentes niveles de potencia de carga  $S_C$  equilibrada y con f.d.p. igual a la unidad.

Tabla 4-2. Escenarios trifásicos en condiciones de desequilibrio tipo 2 con  $S_C = 1$  pu. Elaboración propia.

Nº DE ESCENARIO	$S_C$ (pu)	$V_{1(R)}$ (pu)	$V_{1(S)}$ (pu)	$V_{1(T)}$ (pu)	$\varphi_{1(R)}$ (°)	$\varphi_{1(S)}$ (°)	$\varphi_{1(T)}$ (°)
1	1,5	0,95	1	1,05	0	-120	120
2	1,2	0,95	1	1,05	0	-120	120
3	1	0,95	1	1,05	0	-120	120
4	0,9	0,95	1	1,05	0	-120	120
5	0,7	0,95	1	1,05	0	-120	120
6	0,6	0,95	1	1,05	0	-120	120
7	0,5	0,95	1	1,05	0	-120	120
8	0,4	0,95	1	1,05	0	-120	120
9	0,3	0,95	1	1,05	0	-120	120
10	0,2	0,95	1	1,05	0	-120	120
11	0,1	0,95	1	1,05	0	-120	120
POTENCIA BASE TRIFÁSICA: 1 MVA							
TENSIÓN BASE EN EL NUDO SLACK: $V_{base} = 20$ kV							

Por último, las condiciones de desequilibrio denominadas como tipo 3 solo presenta el desequilibrio en los factores de potencia de las cargas, haciendo que la potencia de una de las fases sea distinta al resto. Formulando estos escenarios se persigue estudiar el impacto que tiene en el error tomar diferentes factores de potencia en las cargas. En la *Tabla 4-3* se muestran tres ejemplos de escenarios con estos desequilibrios para una  $S_C = 1$  MVA.

Tabla 4-3. Ejemplos de escenarios trifásicos en condiciones de desequilibrio tipo 3 con  $S_C = 1$  pu. Elaboración propia.

Nº DE ESCENARIO	$V_1^*$ (pu)	$P_{2(R)}$ (pu)	$P_{2(S)}$ (pu)	$P_{2(T)}$ (pu)	$Q_{2(R)}$ (pu)	$Q_{2(S)}$ (pu)	$Q_{2(T)}$ (pu)
1	0,95	0,80	1	1	0,60	0	0
2	1	0,80	1	1	0,60	0	0
3	1,05	0,80	1	1	0,60	0	0
EN TODOS LOS ESCENARIOS: cos ( $\varphi$ )=1 para las fases S y T; y cos ( $\varphi$ )=0,8 para la fase R							
*Para todos los escenarios la tensión del nudo slack ( $V_1$ ) es equilibrada y sus ángulos están desfasados 120° entre sí.							
LA POTENCIA BASE PARA EL CASO TRIFÁSICO ES 1/3 MVA							



## 5 EVALUACIÓN DE SIMULACIONES

En este apartado se muestran los resultados obtenidos con las simulaciones de los escenarios implementados para cada caso.

### 5.1 Evaluación del modelo monofásico

En este apartado se van a mostrar los resultados de las simulaciones de los escenarios monofásicos implementados. Como se comentó en apartados anteriores, se han realizado ensayos de este modelo con un amplio rango de potencia, desde un entorno con carga menor a la nominal hasta situaciones con sobrecargas, en distintos niveles de tensión y de factor de potencia.

Tabla 5-1. Pérdidas de potencia activa para los diferentes escenarios con  $S_C = 0,63$  pu. Elaboración propia.

Nº DE ESCENARIO	$S_C$ (pu)*	$V_1$ (pu)**	$\cos(\varphi)$	PERDIDAS TOTALES (W)	PERDIDAS HIERRO (W)	PERDIDAS COBRE (W)
1	1	1	1	7999,6	1264	6735,6
2			0,98	8106,8	1264	6842,8
3			0,95	8166,4	1264	6902,4
4			0,9	8229,8	1264	6965,8
5			0,85	8275,1	1264	7011,1
6			0,8	8310,3	1264	7046,3
7		0,95	1	8625,3	1140,8	7484,5
8			0,98	8757,9	1140,8	7617,1
9			0,95	8831,8	1140,8	7691
10			0,9	8910,7	1140,8	7769,9
11			0,85	8967	1140,8	7826,2
12			0,8	9011	1140,8	7870,2
13		1,05	1	7488,3	1393,6	6094,7
14			0,98	7575,9	1393,6	6182,3
15			0,95	7624,5	1393,6	6230,9
16			0,9	7676,1	1393,6	6282,5
17			0,85	7712,9	1393,6	6319,3
18			0,8	7741,5	1393,6	6347,9
* POTENCIA BASE MODELO MONOFÁSICO: $S_{B1}=1$ MVA						
TENSIÓN BASE EN EL NUDO SLACK: $V_{base}= 20$ Kv						

En la *Tabla 5-1* se han expuesto las pérdidas obtenidas en los ensayos con una potencia de carga aparente de 630 kVA, tanto las pérdidas totales como las pérdidas en el hierro y en el cobre en distintos niveles de tensión y factor de potencia. Sin embargo, las conclusiones obtenidas de esta tabla pueden extrapolarse a todos los niveles de potencia de carga simulados, cumpliéndose lo siguiente:

- Para un mismo nivel de carga  $S_C$  y de tensión, cuanto mayor es el factor de potencia, con límite en la unidad, menores son las pérdidas totales del transformador.
- Para un mismo nivel de carga  $S_C$ , cuanto menor sea la tensión del nudo slack, mayores son las pérdidas totales en el transformador.

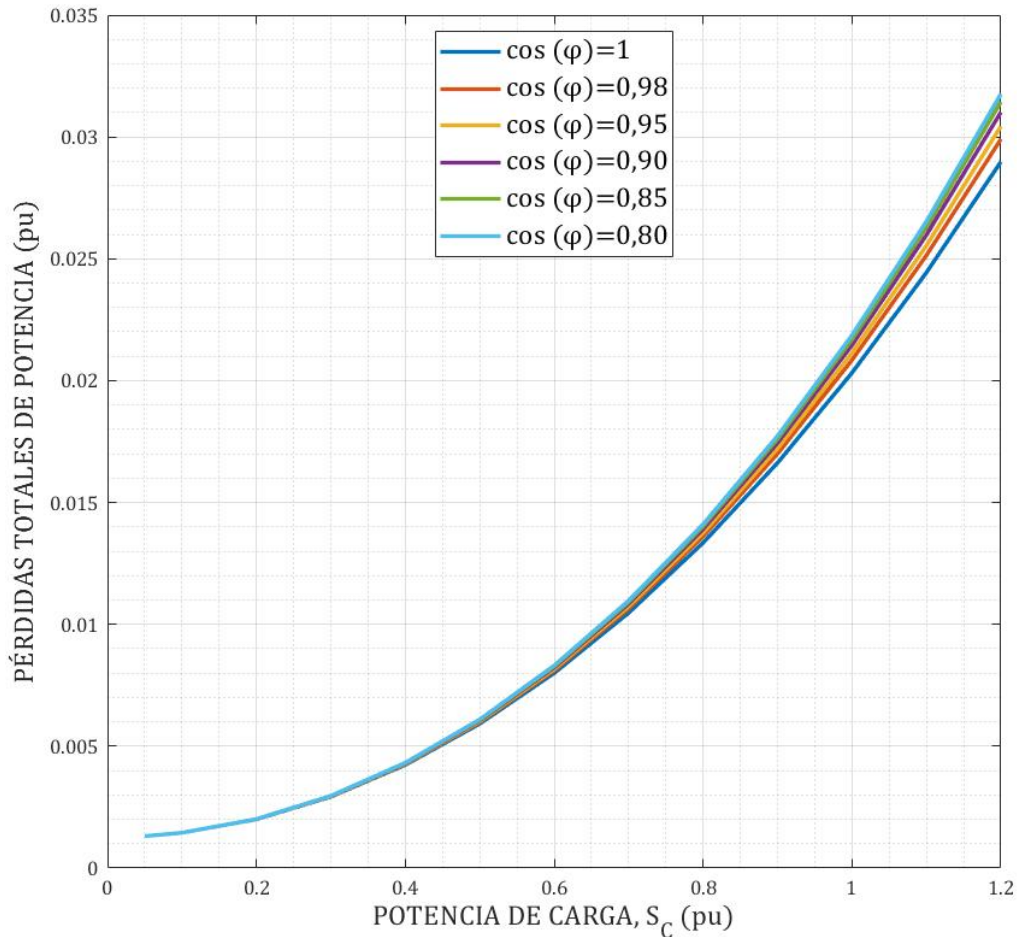


Figura 5-1. Gráfica de pérdidas de potencia activa en el transformador frente a la potencia de carga aparente con diferentes factores de potencia. Elaboración propia.

En la *Figura 5-1* se visualiza la gráfica que relaciona las pérdidas totales de potencia activa del transformador frente a la potencia de carga aparente  $S_C$  para diferentes valores del factor de potencia. Se observa que cuanto mayor es el factor de potencia menores son las pérdidas totales. Luego, el funcionamiento ideal del transformador es aquel en el que funcione con factor de potencia unidad.

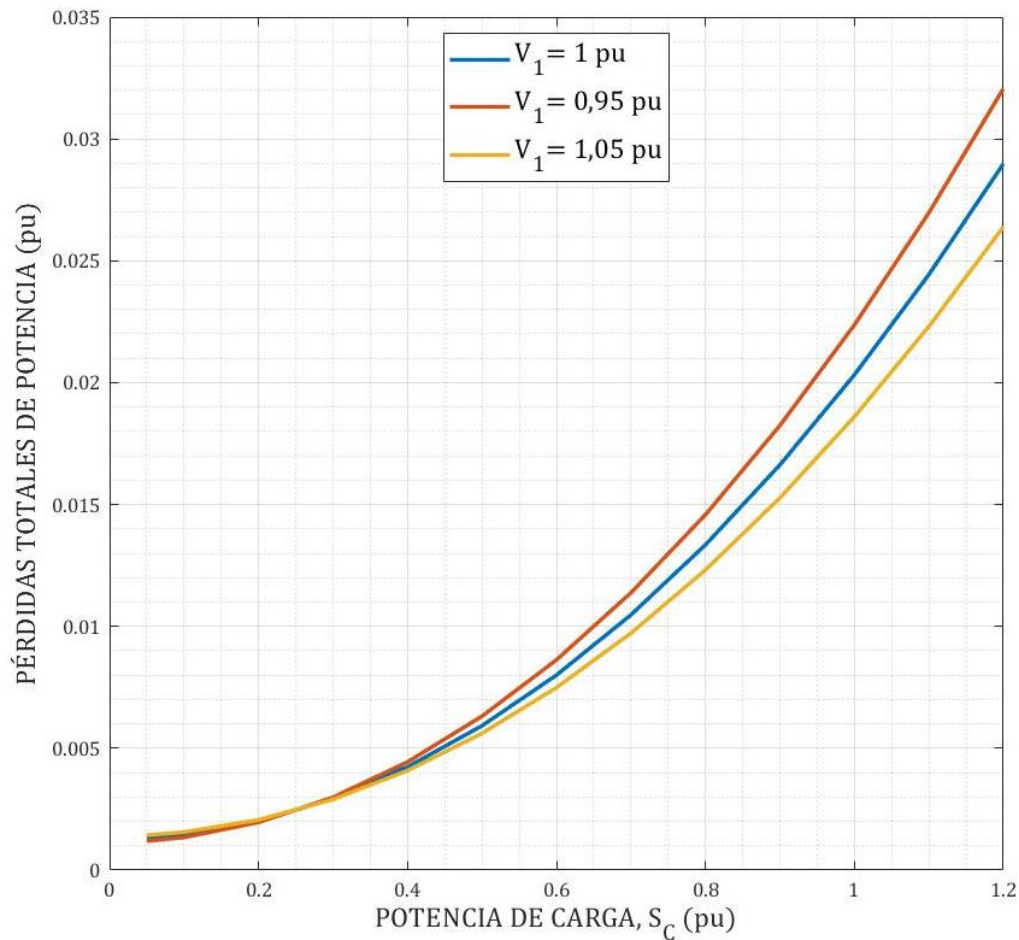


Figura 5-2. Gráfica de pérdidas de potencia activa en el transformador frente a la potencia de carga aparente para diferentes tensiones del nudo slack con  $\cos(\varphi) = 1$ . Elaboración propia.

En la gráfica de la *Figura 5-2* se representan las pérdidas totales de potencia activa del transformador con respecto a la potencia de carga aparente  $S_C$  para los distintos valores de tensión del nudo slack impuestos manteniendo el factor de potencia constante en la unidad. Como puede observarse, se pueden distinguir dos tramos en las curvas representadas:

- Desde una potencia de carga de 0,05 pu hasta 0,25 pu; las pérdidas son mayores cuanto mayor es la tensión. Sin embargo, la diferencia de entre estas pérdidas asociadas a cada tensión son mínimas, del orden de 0,0001 pu (100 W).
- Desde 0,25 pu hasta 1,20 pu de potencia de carga, las pérdidas de potencia activa del transformador son mayores cuando menor es la tensión del nudo slack. La diferencia de las pérdidas se hace mayor con el aumento de  $S_C$ .

## 5.2 Evaluación del modelo trifásico

### 5.2.1 Evaluación de las simulaciones en escenarios trifásicos equilibrados

Al igual que se trató en el apartado 3.3 (“Modelo trifásico en condiciones de equilibrio”), las pérdidas de potencia del transformador obtenidas con estos escenarios trifásicos equilibrados son idénticas a las obtenidas con los escenarios monofásicos. La diferencia radica en que en este modelo hay tres fases por cada magnitud de la red. En el caso de las tensiones, las tres fases presentan el mismo módulo pero están desfasadas entre sí  $120^\circ$ .

Tabla 5–2. Resultados obtenidos para los diferentes escenarios equilibrados con  $S_C = 1$  pu. Elaboración propia.

$S_C$ (pu)	$V_{1(R)}$ (pu)*	$\cos(\varphi)$	$\varphi_{2(R)}$ ( $^\circ$ )	$\varphi_{2(S)}$ ( $^\circ$ )	$\varphi_{2(T)}$ ( $^\circ$ )	$V_{2(R)}$ (pu)*	I NEUTRO (pu)	PERDIDAS TOTALES (W)
1	1	1	26,149	-93,851	146,150	0,97908	0	20321
		0,98	26,390	-93,610	146,391	0,96593	0	20843
		0,95	26,605	-93,392	146,603	0,95872	0	21139
		0,9	26,913	-93,089	146,912	0,95112	0	21458
		0,85	27,195	-92,802	147,193	0,94575	0	21687
		0,8	27,465	-92,532	147,462	0,94159	0	21868
	0,95	1	25,721	-94,280	145,720	0,92766	0	22369
		0,98	25,983	-94,017	145,984	0,91375	0	23020
		0,95	26,219	-93,782	146,219	0,90612	0	23390
		0,9	26,558	-93,444	146,557	0,89806	0	23791
		0,85	26,871	-93,129	146,872	0,89236	0	24081
		0,8	27,170	-92,831	147,170	0,88794	0	24310
	1,05	1	26,515	-93,484	146,517	1,0303	0	18602
		0,98	26,738	-93,260	146,740	1,0179	0	19026
		0,95	26,934	-93,066	146,935	1,011	0	19265
		0,9	27,214	-92,785	147,216	1,0038	0	19523
		0,85	27,471	-92,527	147,474	0,99874	0	19707
		0,8	27,715	-92,286	147,714	0,99481	0	19852

\* El módulo de la tensión es igual en todas las fases, los ángulos son  $0^\circ$ ,  $-120^\circ$  y  $120^\circ$ , respectivamente para cada fase.



En la *Tabla 5-2*, aparte de mostrarse las pérdidas de potencia activa del transformador, se han mostrado también los valores de la tensión del nudo 2 (en módulo y fase) y la intensidad que pasa por el neutro. Como se puede contemplar, la intensidad que pasa por el neutro es nula, esto ocurre al tratarse de escenarios trifásicos equilibrados. Además, las fases de las tensiones del nudo 2 están desfasadas entre sí  $120^\circ$ . Las conclusiones de estos resultados obtenidos coinciden con las del caso monofásico.

## 5.2.2 Evaluación de las simulaciones en escenarios trifásicos desequilibrados

### A) Simulaciones de escenarios en condiciones de desequilibrio de tipo 1:

El desequilibrio se presenta en la potencia del nudo 2, las potencias de las fases R y T tienen un cierto desequilibrio con respecto a la potencia de la fase central S. El resto de los parámetros se mantienen equilibrados e iguales a la unidad (tensión del nudo slack y f.d.p. igual a la unidad).

Tabla 5–3. Resultados obtenidos para los diferentes escenarios desequilibrados con  $S_C = 0,63$  pu. Elaboración propia.

Nº DE ESCENARIO	DESEQUILIBRIO (pu)*	$P_{2(R)}$ (pu)*	$P_{2(S)}$ (pu)*	$P_{2(T)}$ (pu)*	$Q_{2(R)}$ (pu)*	$Q_{2(S)}$ (pu)*	$Q_{2(T)}$ (pu)*	$P_{LOSS}$ (kW)	$Q_{LOSS}$ (kVAr)
1	0	0,63	0,63	0,63	0	0	0	8,7	34,2
2	0,05	0,58	0,63	0,68	0	0	0	8,73	34,3
3	0,1	0,53	0,63	0,73	0	0	0	8,83	34,6
4	0,2	0,43	0,63	0,83	0	0	0	9,23	36,1
5	0,315	0,315	0,63	0,945	0	0	0	10,01	38,9
6	0,4	0,23	0,63	1,03	0	0	0	10,82	41,8
7	0,5	0,13	0,63	1,13	0	0	0	12,01	46,1
8	0,63	0	0,63	1,26	0	0	0	13,96	53,1
La tensión del nudo slack es equilibrada e igual a la unidad.									
* La potencia base para el modelo trifásico es 1/3 MVA.									

En la *Tabla 5-3* se presentan las pérdidas de potencia del transformador (de potencia activa y de reactiva) imponiendo una potencia de carga nominal,  $S_C$  de 630 kVA. Las fases R y T son las que presentan los desequilibrios, por ejemplo: en el escenario 5 el desequilibrio es de 0,315 pu (0,105 MW porque la potencia base es 1/3 MVA), entonces la fase R tiene una potencia activa de carga de 105 kW, la fase T de 315 kW y la fase S (la fase central) de 210 kW. Luego, la potencia trifásica (la suma de la potencia de cada fase) es igual a 630 kW. Lo mismo ocurre con la potencia reactiva. Cabe destacar, para todas las simulaciones con este tipo de desequilibrio, se ha considerado un factor de potencia igual a 1 y una tensión del nudo slack equilibrada e igual a la tensión nominal del transformador (20 kV).

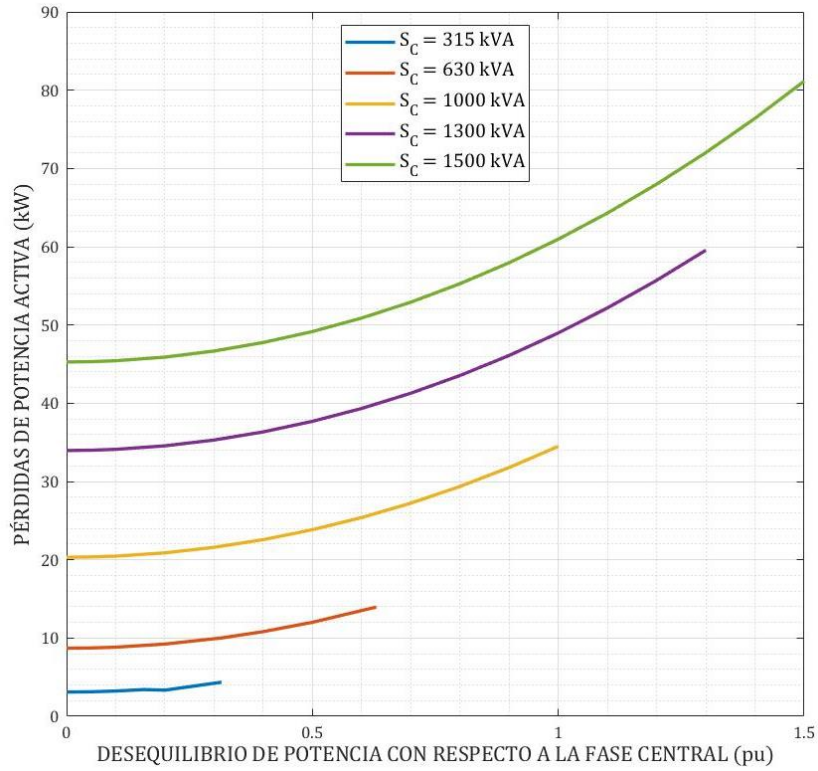


Figura 5-3. Gráfica de pérdidas de potencia activa frente a nivel de desequilibrio. Elaboración propia.

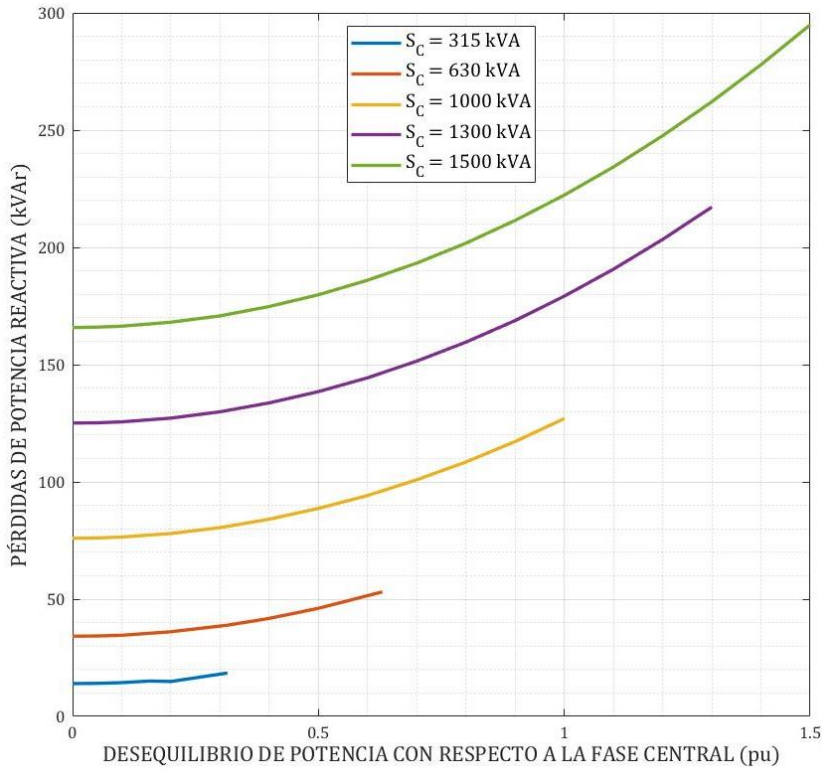


Figura 5-4. Gráfica de pérdidas de potencia reactiva frente a nivel de desequilibrio. Elaboración propia.

En la *Figura 5-3* y la *Figura 5-4* se representan las pérdidas de potencia activa y pérdidas de potencia reactiva, respectivamente, con respecto al nivel de desequilibrio de la potencia de carga en cada fase del nudo 2. Como se puede contemplar en ambas gráficas, a medida que aumenta el desequilibrio entre las fases, aumentan también las pérdidas de potencia. Además, las pérdidas son mayores cuanto mayor sea la potencia trifásica de carga impuesta.

B) **Simulaciones de escenarios en condiciones de desequilibrio de tipo 2:** El desequilibrio viene dado en las fases de la tensión del nudo slack.

Tabla 5-4. Resultados obtenidos para los diferentes escenarios con tensiones desequilibradas. Elaboración propia.

Nº DE ESCENARIO	V <sub>1(R)</sub> (pu)	V <sub>1(S)</sub> (pu)	V <sub>1(T)</sub> (pu)	P <sub>2(R)</sub> (pu)	P <sub>2(S)</sub> (pu)	P <sub>2(T)</sub> (pu)	Q <sub>2(R)</sub> (pu)	Q <sub>2(S)</sub> (pu)	Q <sub>2(T)</sub> (pu)	P <sub>LOSS</sub> (kW)	Q <sub>LOSS</sub> (kVAr)
1	0,95	1	1,05	0,05	0,05	0,05	0	0	0	45,32	166
2	0,95	1	1,05	0,1	0,1	0,1	0	0	0	29,01	107,3
3	0,95	1	1,05	0,2	0,2	0,2	0	0	0	20,34	76,1
4	0,95	1	1,05	0,3	0,3	0,3	0	0	0	16,64	62,8
5	0,95	1	1,05	0,4	0,4	0,4	0	0	0	13,36	50,9
6	0,95	1	1,05	0,5	0,5	0,5	0	0	0	10,48	40,6
7	0,95	1	1,05	0,6	0,6	0,6	0	0	0	8,01	31,7
8	0,95	1	1,05	0,7	0,7	0,7	0	0	0	5,93	24,2
9	0,95	1	1,05	0,8	0,8	0,8	0	0	0	4,24	18,1
10	0,95	1	1,05	0,9	0,9	0,9	0	0	0	2,93	13,4
11	0,95	1	1,05	1	1	1	0	0	0	2	10
12	0,95	1	1,05	1,2	1,2	1,2	0	0	0	1,45	8,1
13	0,95	1	1,05	1,5	1,5	1,5	0	0	0	1,31	7,6
TENSIÓN BASE: V <sub>B</sub> = 20 kV											
LOS ÁNGULOS DE TENSIÓN DE CADA FASE ESTÁN DESFASADOS 120° ENTRE SÍ											
POTENCIA BASE PARA EL MODELO TRIFÁSICO: S <sub>B3</sub> = 1/3 MVA											

En la *Tabla 5-4* se han detallado las pérdidas de potencia activa y reactiva del transformador cuando se impone una tensión del nudo slack con un desequilibrio del 5% de la tensión nominal con respecto a la tensión central. Todo ello, con una potencia de carga equilibrada y con f.d.p. igual a la unidad en cada escenario. Además, estos resultados se han representado en las gráficas en la *Figura 5-5* y de la *Figura 5-6*.

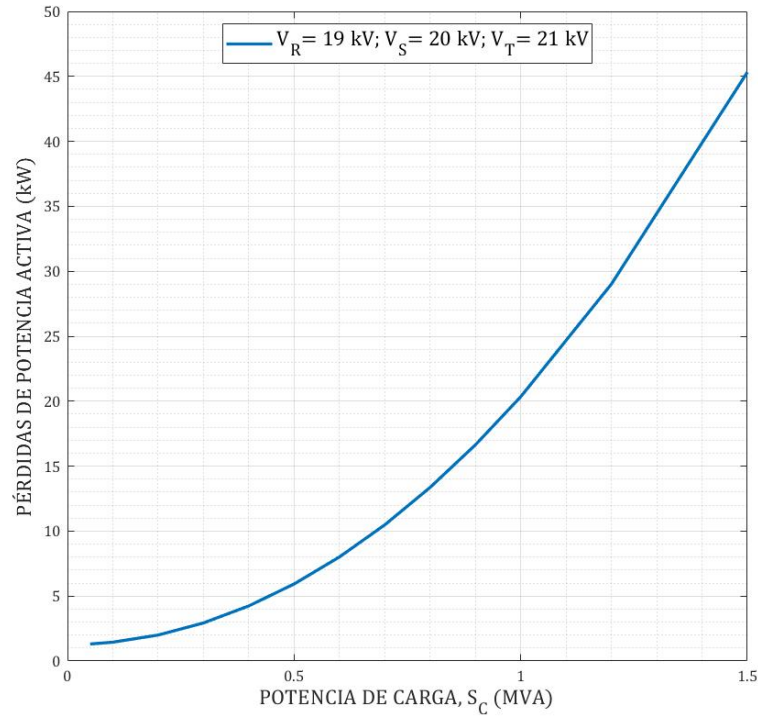


Figura 5-5. Gráfica de pérdidas de potencia activa para escenarios con un 5% de desequilibrio de tensión con respecto a la fase central. Elaboración propia.

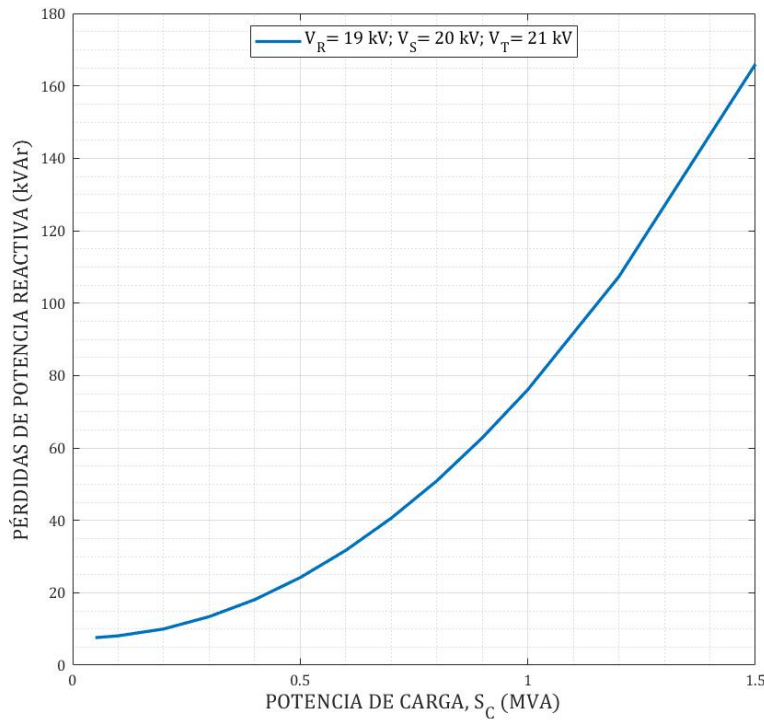


Figura 5-6. Gráfica de pérdidas de potencia reactiva para escenarios con un 5% de desequilibrio de tensión con respecto a la fase central. Elaboración propia.

Por otro lado, además del estudio de las pérdidas en escenarios con desequilibrios de tensión en las tres fases, se han estudiado las pérdidas para escenarios donde solo la tensión de una fase es diferente al resto. Con esto se ha perseguido estudiar si el modelo implementado del transformador considera la asimetría del transformador de tres columnas. Pues, en un transformador de tres columnas existe una pequeña asimetría en el circuito magnético: el flujo de la columna central tiene un recorrido más corto y, por tanto, de menor reluctancia. Para comprobar si el modelo asumía esta asimetría se han simulado dos situaciones diferentes: en una la fase R tiene una tensión de 0,95 pu mientras que el resto tiene una tensión nominal; y en la segunda situación, es la fase central S es la que se encuentra desequilibrada con las demás. A continuación, se muestra una gráfica donde se comparan las pérdidas en ambas situaciones.

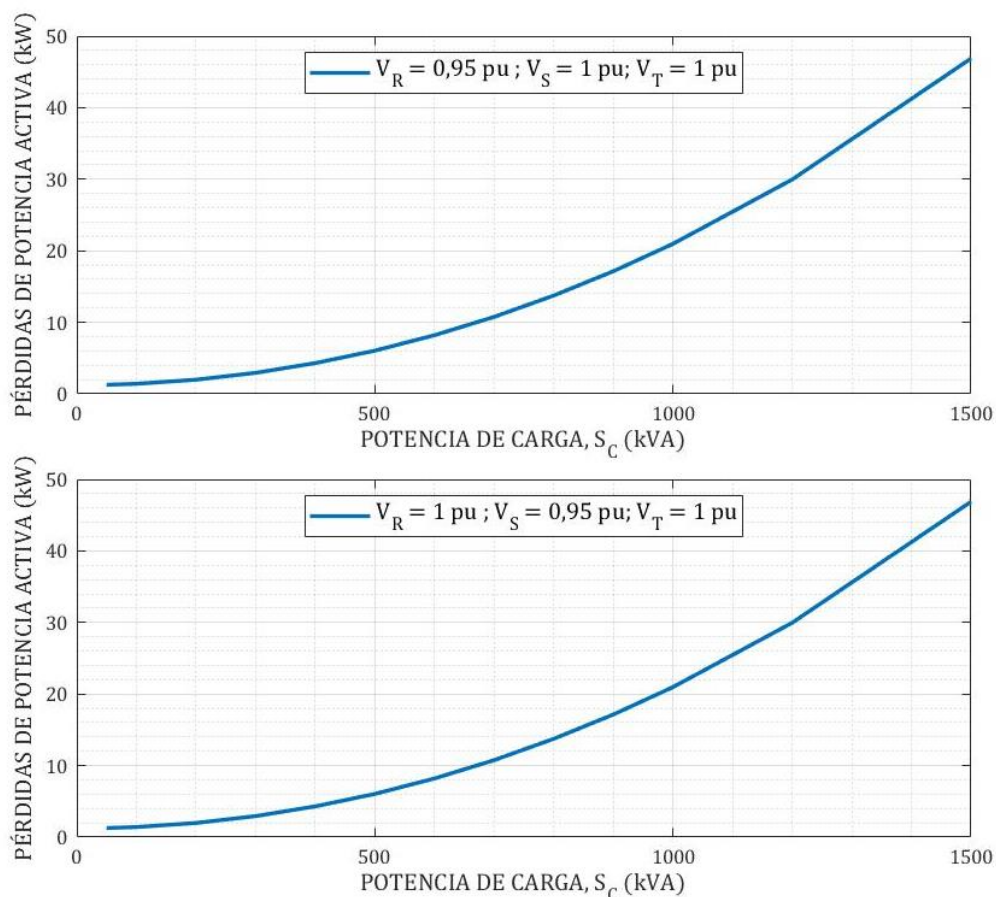


Figura 5-7. Gráfica de pérdidas de potencia activa en el transformador en dos situaciones de desequilibrio diferentes. Elaboración propia.

Como puede observarse en las gráficas de la *Figura 5-7*, las pérdidas de potencia activa son idénticas para ambas situaciones. Esto quiere decir que no importa en qué fase se produzca el desequilibrio porque el modelo implementado no considera la asimetría del transformador.

### C) Simulaciones de escenarios en condiciones de desequilibrio de tipo 3:

Como se comentó en apartados anteriores, en estos escenarios el desequilibrio se da en el factor de potencia de cada fase de la carga. Las fases S y T tienen un  $\cos(\varphi) = 1$  y la fase R tiene un  $\cos(\varphi) = 0,8$ . En este subapartado, además de calcular las pérdidas que se producen en estas condiciones, también se va a representar el desequilibrio que se da entre las fases de la tensión del nudo 2.

Tabla 5-5. Resultados obtenidos en escenarios con desequilibrios de tipo 3. Elaboración propia.

Nº DE ESCENARIO	V <sub>1</sub> (pu)	S <sub>c</sub> (pu)	V <sub>2(R)</sub> (pu)	V <sub>2(S)</sub> (pu)	V <sub>2(T)</sub> (pu)	P <sub>LOSS</sub> (kW)	Q <sub>LOSS</sub> (kVAR)
1	0,95	1,20	0,87404	0,92237	0,92237	33,23	122,2
2		1	0,88794	0,92766	0,92766	23,02	85,4
3		0,8	0,90128	0,93265	0,93265	14,9	56,2
4		0,2	0,93843	0,94604	0,94604	1,96	9,6
5	1	1,20	0,92868	0,97421	0,97421	29,91	110,5
6		1	0,94159	0,97908	0,97908	20,84	77,9
7		0,8	0,95405	0,98371	0,98371	13,6	51,8
8		0,2	0,98903	0,99625	0,99625	2	10,1
9	1,05	1,20	0,98274	1,0258	1,0258	27,14	100,8
10		1	0,99481	1,0303	1,0303	19,02	71,6
11		0,8	1,0065	1,0346	1,0346	12,52	48,2
12		0,2	1,0396	1,0464	1,0464	2,06	10,6
El módulo de la tensión del nudo slack es igual en cada fase y sus ángulos están desfasados entre sí 120°							
En las fases S y T: $\cos(\varphi) = 1$ En la fase R: $\cos(\varphi) = 0,80$							

En la *Tabla 5-5* se visualizan los resultados obtenidos para los escenarios en los que una fase del nudo 2 tiene un factor de potencia distinto al resto de las fases. Además, se han simulado para diferentes valores de potencia de carga y tensión del nudo slack. Cabe destacar que el desequilibrio del factor de potencia trae como consecuencia un desequilibrio de la tensión del nudo 2. Tal y como puede comprobarse, en cada escenario el módulo de la tensión del nudo 2 es igual en las fases S y T, y diferente en la fase R. A continuación, se va a estudiar la diferencia entre el módulo de las fases en distintas tensiones del nudo slack y en distintas cargas (*Figura 5-7*).

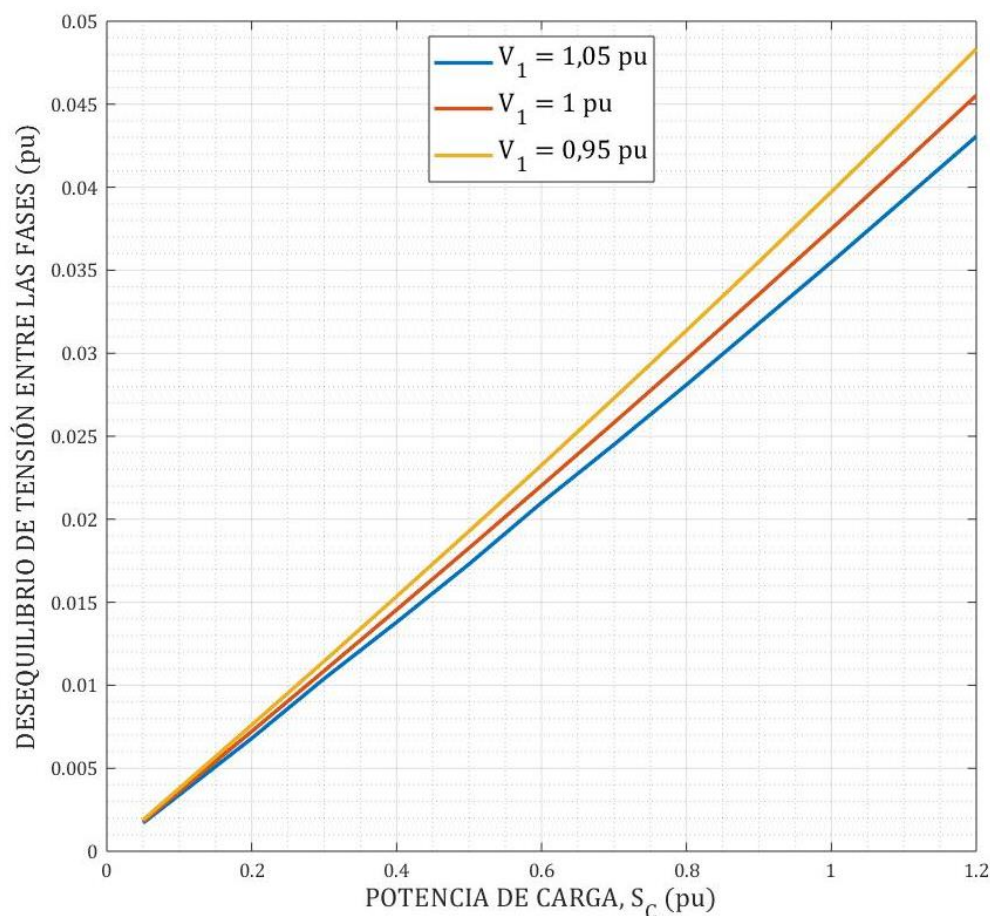


Figura 5-8. Gráfica del error en tensión entre las fases del nudo 2 provocadas por el desequilibrio del f.d.p. para diferentes niveles de tensión y potencia de carga. Elaboración propia.

En la *Figura 5-8* se ha representado la gráfica que relaciona el desequilibrio en por unidad de la tensión del nudo 2, generado por tener una fase con distinto factor de potencia, frente a la potencia  $S_C$  para diferentes valores de tensión equilibrada del nudo slack. Se ha impuesto un factor de potencia de 0,8 para la fase R y de 1 para las fases S y T. Como puede observarse, la diferencia entre el módulo de las fases de la tensión del nudo 2 es mayor cuanto mayor es la potencia de carga y cuanto menor es la tensión del nudo slack. Para una tensión del nudo slack igual a la nominal, el error entre las fases para una carga nominal alcanza 0,038 pu de diferencia entre las fases del nudo 2, es decir; 15,96 V de diferencia entre las fases (la tensión base en el secundario es 420 V).





## 6 ANÁLISIS DE RESULTADOS

En este apartado se realiza una comparativa entre ambos modelos que permitirá obtener conclusiones. Se analizará en qué condiciones se ajusta mejor un modelo trifásico de transformador en vez de un modelo monofásico.

### A) Análisis de las pérdidas de potencia en escenarios trifásicos equilibrados en comparación con sus escenarios monofásicos equivalentes.

Como se ha señalado en apartados anteriores, comparar que las pérdidas de potencia son iguales en escenarios trifásicos y en sus equivalentes monofásicos es fundamental para realizar este estudio. Pues, esto valida los modelos de transformador que se han implementado en el programa de Matlab facilitado. Luego, en la *Tabla 6-1* se puede comprobar como para diferentes cargas trifásicas, con factor de potencia igual a 1, el error en la potencia activa se mantiene nulo.

Tabla 6–1. Error en pérdidas de potencia activa para escenarios equilibrados con f.d.p. igual a 1. Elaboración propia.

TRIFÁSICO EQUILIBRADO					MONOFÁSICO			$\epsilon$ P <sub>LOSS</sub> (W)
V <sub>1(R)</sub> (pu)	P <sub>2(R)</sub> (pu)	P <sub>2(S)</sub> (pu)	P <sub>2(T)</sub> (pu)	PERDIDAS TOTALES (W)	V <sub>1</sub> (pu)	P <sub>2</sub> (pu)	PERDIDAS TOTALES (W)	
1,05	1,20	1,20	1,20	26392	1,05	1,20	26392	0
	0,90	0,90	0,90	15273		0,90	15273	0
	0,60	0,60	0,60	7488,3		0,60	7488,3	0
	0,30	0,30	0,30	2900,3		0,30	2900,3	0
1	1,20	1,20	1,20	28981	1	1,20	28981	0
	0,90	0,90	0,90	16626		0,90	16626	0
	0,60	0,60	0,60	7999,6		0,60	7999,6	0
	0,30	0,30	0,30	2927		0,30	2927	0
0,95	1,20	1,20	1,20	32061	0,95	1,20	32061	0
	0,90	0,90	0,90	18242		0,90	18242	0
	0,60	0,60	0,60	8625,3		0,60	8625,3	0
	0,30	0,30	0,30	2985,9		0,30	2985,9	0
Potencia base en el modelo trifásico: 1/3 MVA								
Potencia base en el modelo monofásico: 1 MVA								
La potencia reactiva en todos los escenarios es nula porque se ha considerado un factor de potencia igual a la unidad.								
La tensión del nudo slack para el caso trifásico es equilibrada (igual módulo en cada fase y con sus ángulos desfasados 120°).								

De igual forma, en la *Tabla 6-2* puede constatar que el error en pérdidas de potencia reactiva también se mantiene nulo. En este caso se han expuesto escenarios con diferentes factores de potencia para comprobar que en estos casos las pérdidas en ambos modelos son también idénticas.

Tabla 6–2. Error en pérdidas de potencia reactiva para escenarios equilibrados  $S_C$  igual a 1 MVA.  
Elaboración propia.

TRIFÁSICO EQUILIBRADO					MONOFÁSICO				
$V_{1(R)}$ (pu)	$\cos$ ( $\phi$ )	$P_{2(S)}$ (pu)	$Q_{2(S)}$ (pu)	PERDIDAS TOTALES (kVAr)	$V_1$ (pu)	$P_2$ (pu)	$Q_2$ (pu)	PERDIDAS TOTALES (kVAr)	$\epsilon$ $Q_{LOSS}$ (kVAr)
1,05	0,98	0,98	0,199	71,6	1,05	0,98	0,199	71,6	0
	0,90	0,90	0,4359	73,4		0,90	0,4359	73,4	0
	0,85	0,85	0,5268	74,1		0,85	0,5268	74,1	0
	0,8	0,8	0,6	74,6		0,8	0,6	74,6	0
1	0,98	0,98	0,199	77,9	1	0,98	0,199	77,9	0
	0,90	0,90	0,4359	80,1		0,90	0,4359	80,1	0
	0,85	0,85	0,5268	80,9		0,85	0,5268	80,9	0
	0,8	0,8	0,6	81,6		0,8	0,6	81,6	0
0,95	0,98	0,98	0,199	85,4	0,95	0,98	0,199	85,4	0
	0,90	0,90	0,4359	88,2		0,90	0,4359	88,2	0
	0,85	0,85	0,5268	89,3		0,85	0,5268	89,3	0
	0,8	0,8	0,6	90,1		0,8	0,6	90,1	0
Potencia base en el modelo trifásico: 1/3 MVA									
Potencia base en el modelo monofásico: 1 MVA									
La potencia de carga impuesta en cada fase es 1/3 MVA									
La tensión del nudo slack para el caso trifásico es equilibrada (igual módulo en cada fase y con sus ángulos desfasados 120°). La potencia activa y la potencia reactiva también son equilibradas, por eso solo se detalla una fase, sabiendo que el resto son idénticas.									

### B) Análisis de las pérdidas de potencia en escenarios trifásicos desequilibrados en carga en comparación con sus escenarios monofásicos equivalentes.

Este análisis constituye el estudio más importante de este trabajo. Pues, como se introdujo en el primer apartado de esta memoria, la red de distribución presenta desequilibrios que hacen que circulen corrientes por el neutro y esto afecta también a las magnitudes eléctricas de los transformadores. Tanto en la red de transporte como en la red de distribución se asume un modelo monofásico de transformador, pero los resultados obtenidos con este modelo podrían alejarse de la realidad en situaciones de desequilibrio. El objetivo aquí es analizar en qué condiciones de desequilibrio se aproxima mejor un modelo trifásico del transformador.

En la siguiente tabla, *Tabla 6-3*, se recogen los errores de pérdidas de potencia que se comente al asumir un modelo monofásico ante condiciones de desequilibrio. En esta tabla las condiciones de desequilibrio que se han considerado son el desequilibrio de potencia activa de las fases R y T con respecto a la fase central S para la potencia nominal del transformador (630 kVA) y para un factor de potencia igual a la unidad (como consecuencia la potencia reactiva de carga de cada fase es nula), todo ello está detallado en la tabla.

Los errores cometidos en las pérdidas al asumir un modelo monofásico de transformador en estas condiciones desequilibradas vienen reflejados en las dos últimas columnas de esta tabla. Como se puede observar, cuanto mayor es el desequilibrio con respecto a la fase central, mayores son los errores en las pérdidas. Por ejemplo, con un desequilibrio de 16,67 kW apenas hay un error de 0,03 kW y de 0,1 kVAr (escenario 2). Sin embargo, para un desequilibrio de 166,67 kW (que supone un desequilibrio del 80% con respecto a la fase central) el error es de 3,31 kW y 11,9 kVAr. Se puede apreciar como los errores en las pérdidas de potencia reactiva son más sensibles al desequilibrio planteado.

Tabla 6–3. Error en pérdidas de potencia para escenarios desequilibrados con  $S_C$  igual a 0,63 MVA y f.d.p. igual a la unidad. Elaboración propia.

	TRIFÁSICOS DESEQUILIBRADOS				MONOFÁSICOS (EQ.)		COMPARACIÓN	
	$P_{2(R)}$ (kW)	$P_{2(S)}$ (kW)	$P_{2(T)}$ (kW)	$Q_{2(R, S, T)}$ (kVAr)	$P_{TRIF}$ (kW)	$Q_{TRIF}$ (kW)	$\mathcal{E}_{PLOSS}$ (kW)	$\mathcal{E}_{QLOSS}$ (kVAr)
1	210	210	210	0	630	0	0	0
2	193,3	210	226,6	0			0,03	0,1
3	176,6	210	243,3	0			0,13	0,4
4	143,3	210	276,6	0			0,53	1,9
5	105	210	315	0			1,31	4,7
6	76,6	210	343,3	0			2,12	7,6
7	43,3	210	376,6	0			3,31	11,9
8	0	210	420	0			5,26	18,9
El factor de potencia aplicado en las fases de cada escenario es 1, como consecuencia, la potencia reactiva es nula en todas las fases de cada escenario trifásico planteado.								
La tensión del nudo slack es la nominal (20 kV) y sus ángulos están desfasados 120° entre sí.								
En esta tabla solo se muestran los resultados para los escenarios trifásicos desequilibrados con potencia trifásica igual a 1 MW.								

Los transformadores con el nivel de transformación que se está estudiando frecuentemente funcionan con una carga menor a la nominal. Y, en zonas donde la población es estacional los transformadores pueden funcionar con ciertas sobrecargas en determinados meses del año. Luego, es importante analizar también los errores que se comenten con estos desequilibrios tanto en situaciones en las que el transformador trabaja por debajo de su carga nominal y donde trabaja con sobrecargas importantes. A continuación, se muestra un estudio de los errores de pérdidas de potencia que se dan en las diferentes cargas del transformador.

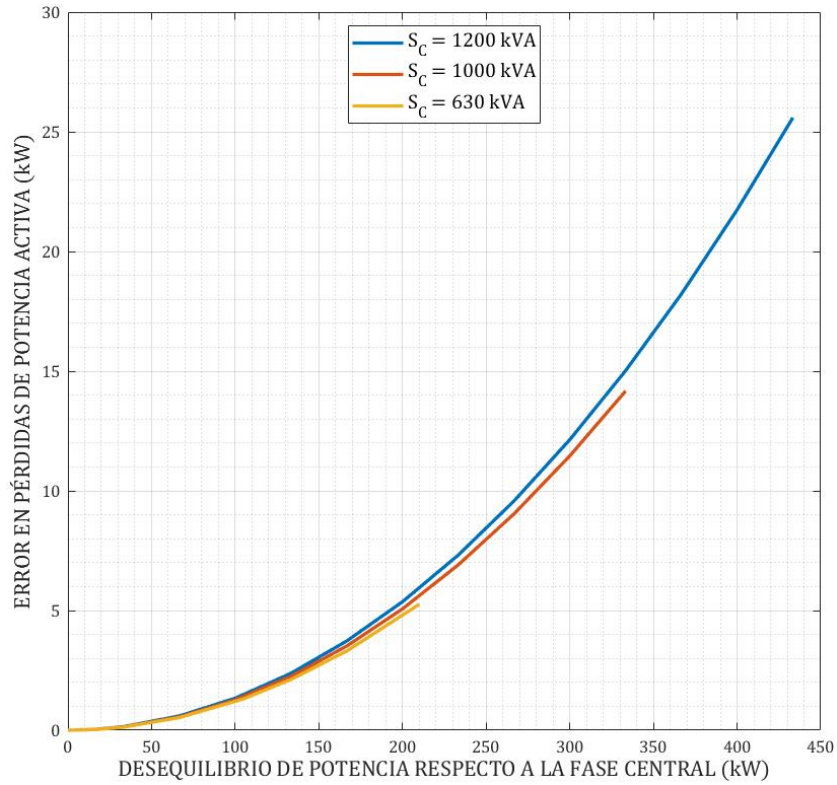


Figura 6-1. Gráfica de la evolución del error en potencia activa para diferentes potencias de carga.  
Elaboración propia.

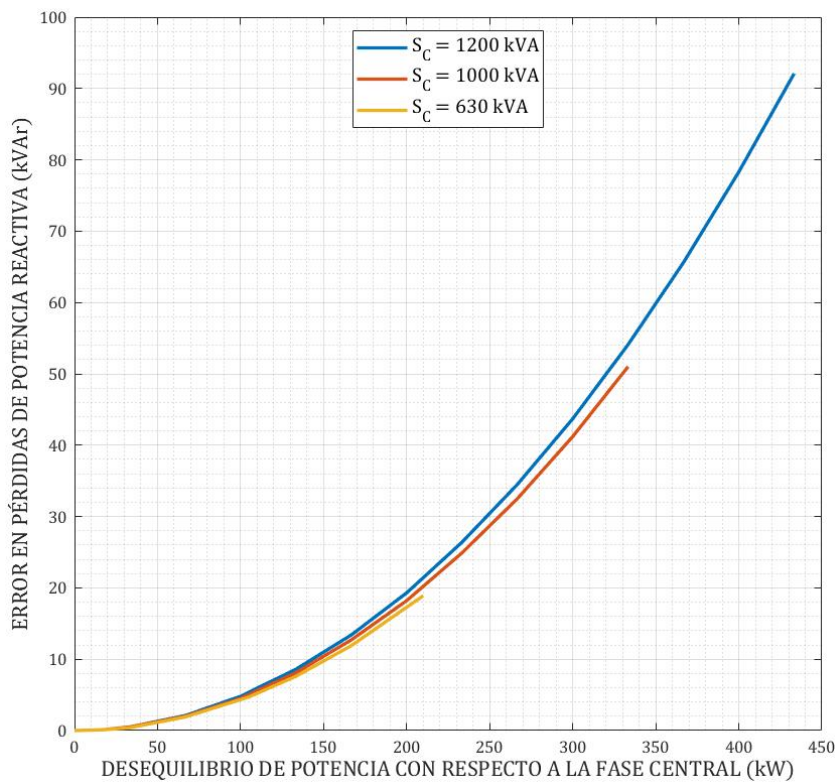


Figura 6-2. Gráfica de la evolución del error en potencia reactiva para diferentes potencias de carga.  
Elaboración propia.

Tanto en la gráfica de la *Figura 6-1* y en la gráfica de la *Figura 6-2* se puede comprobar que, para un mismo desequilibrio de potencia, cuanto mayor es la potencia de carga, mayor es el error de las pérdidas de potencia activa y reactiva. Para desequilibrios menores de 333,33 kW la diferencia entre los errores de las pérdidas para cada curva es insignificante. Pero si que cobra importancia en desequilibrios mayores donde el transformador trabaja más sobrecargado.

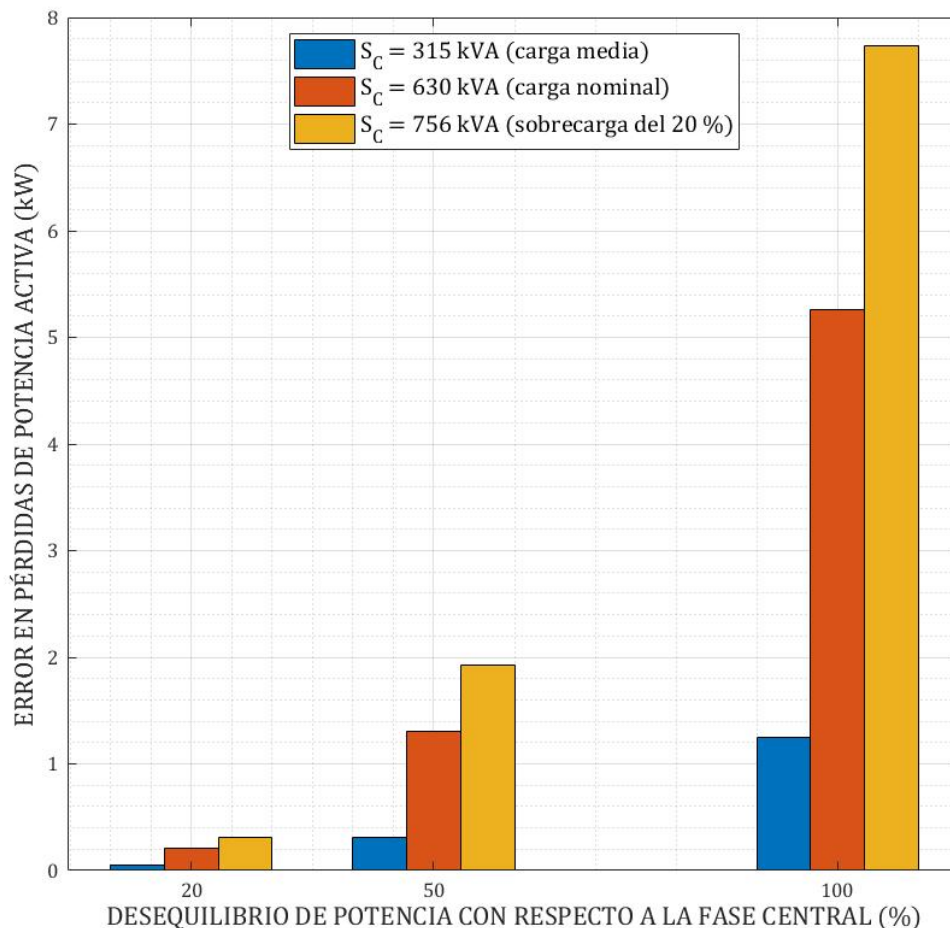


Figura 6-3. Diagrama de barras de los errores en pérdidas de potencia activa para distintos niveles de carga. Elaboración propia.

En la Figura 6-3 se muestra un diagrama donde se analiza, para diferentes niveles de carga, el error cometido en la potencia activa al emplear un modelo monofásico, según el desequilibrio que haya entre sus fases. Como ejemplo, se van a analizar los resultados del transformador con una sobrecarga del 20%. La potencia trifásica, es decir, la suma de la potencia activa de cada fase suma 756 kW. Si hay un desequilibrio de potencia del 50%, significa que la fase central tiene 252 kW y las fases restantes tienen 126 kW y 378 kW. Si hay un desequilibrio del 100% significa que la fase central tiene 252 kW y las fases restantes tienen 0 kW y 504 kW. El error cometido con un desequilibrio del 50% es de 1,93 kW y el cometido con un desequilibrio del 100% es de 7,74 kW.

Sin embargo, estos errores no dan una magnitud útil del error que se comete. Por ello se han construido los diagramas siguientes, donde se analizan estos mismos resultados, pero en tanto por ciento.

En el diagrama de la *Figura 6-4* se han representado los errores de pérdidas de potencia activa en porcentaje en función del desequilibrio con respecto a la fase central, también en porcentaje. Este error en porcentaje se ha calculado como el error absoluto entre las pérdidas de potencia activa entre ambos modelos dividido por las pérdidas de potencia activa del modelo trifásico. Para ello, se han plasmado los errores de varios niveles de carga: carga media (315 kVA), plena carga (630 kVA) y sobrecarga del 20% (756 kVA). Como se puede observar, para un desequilibrio de potencia entre las fases del 20% el error que se comete al emplear un modelo monofásico es aproximadamente en 2,5%. Sin embargo, al aumentar el nivel de desequilibrio el error ya es considerable, pues alcanza más del 10%.

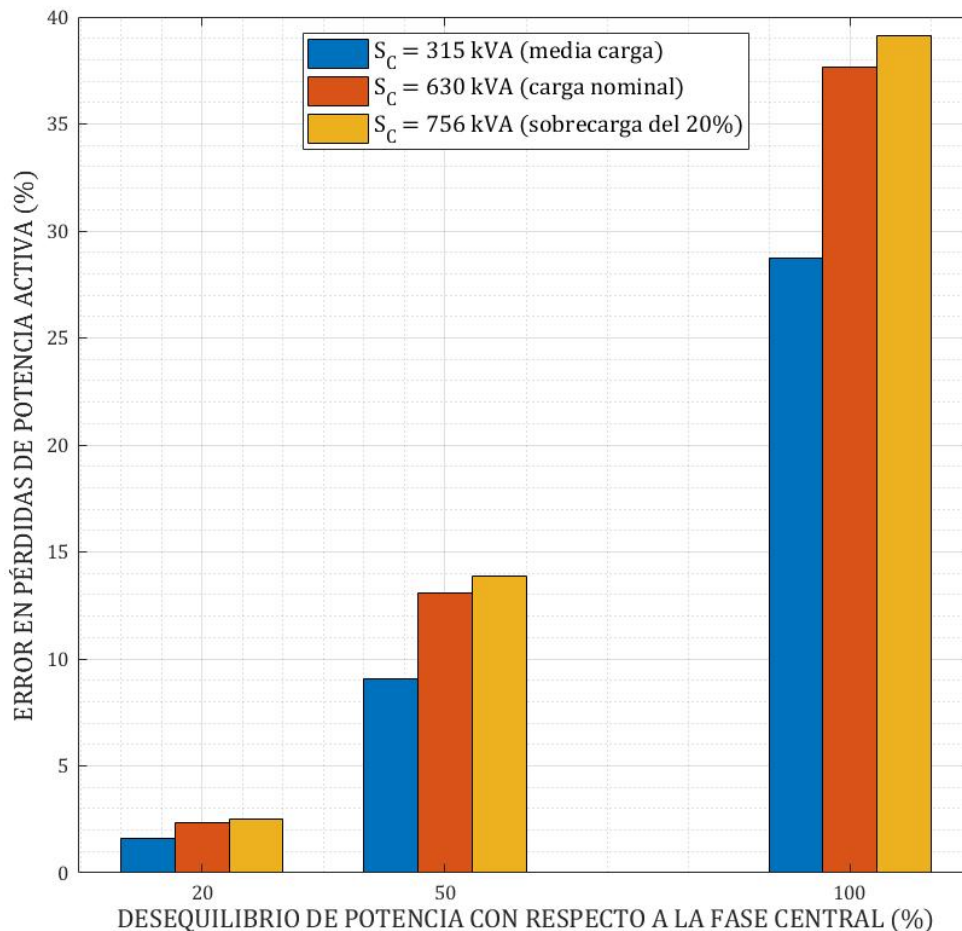


Figura 6-4. Diagrama de barras de los errores en pérdidas de potencia activa (en porcentaje) para distintos niveles de carga. Elaboración propia.

En el diagrama de la *Figura 6-5* se representa lo mismo que en el diagrama anterior pero referido a los errores en las pérdidas de potencia reactiva. Como se contempla, los errores para las pérdidas de potencia reactiva son del mismo orden que para los de potencia activa. Nuevamente, para distintos niveles de carga, los errores son significativos cuando se alcanza el 50% de desequilibrio entre las fases. Pues, para un desequilibrio del 20% el error cometido puede ser asumible por el modelo monofásico. En el caso extremo donde el desequilibrio entre las cargas es del 100%, alcanzan más del 35% de error en potencia. Se vuelve a verificar que, para un mismo nivel de carga, el error en pérdidas de potencia aumenta cuando crece el desequilibrio. Y que, para un mismo desequilibrio, los errores aumentan conforme se aumenta la potencia de carga.



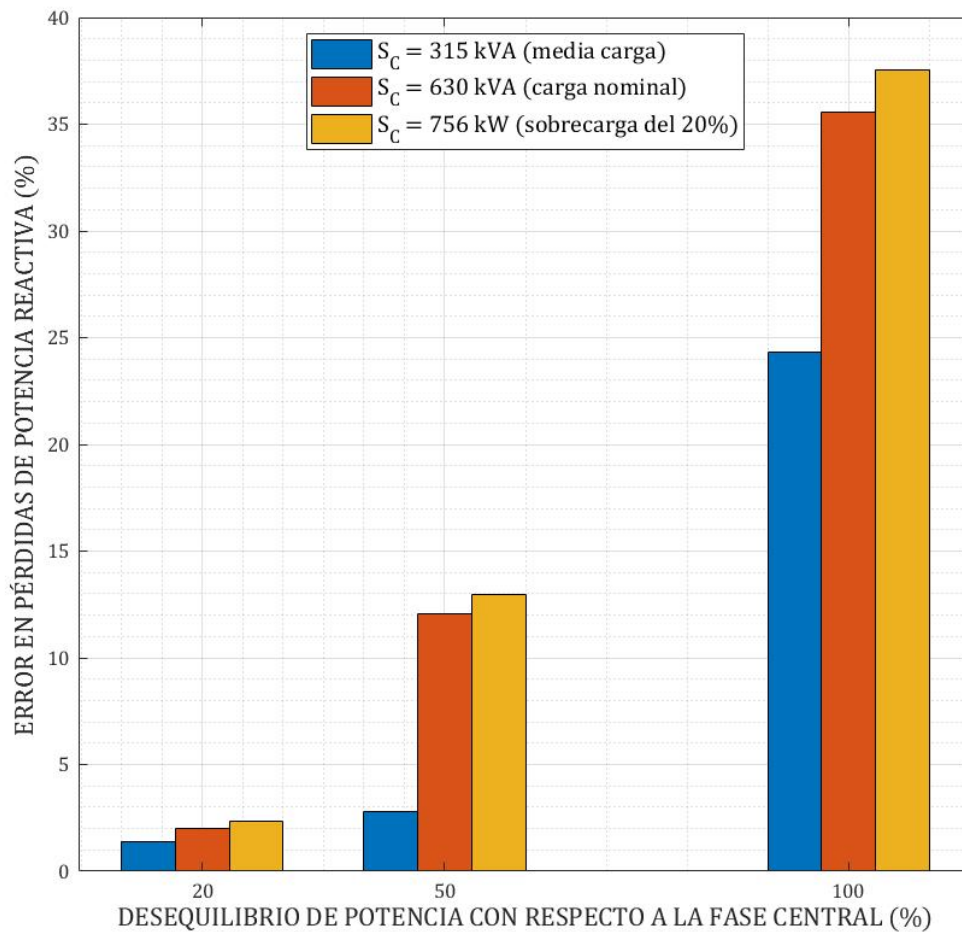


Figura 6-5. Diagrama de barras de los errores en pérdidas de potencia reactiva (en porcentaje) para distintos niveles de carga. Elaboración propia.

### C) Análisis de las pérdidas de potencia en escenarios trifásicos con desequilibrios en la tensión del nudo slack en comparación con sus escenarios monofásicos equivalentes.

En este caso el desequilibrio viene dado en las fases de la tensión del nudo slack. Cada fase del nudo 1 de la red que forma el transformador tiene una tensión distinta:  $V_R = 19$  kV,  $V_S = 20$  kV y  $V_T = 21$  kV. Se ha considerado un desequilibrio entre tensiones del 5% porque lo habitual es que no se supere este valor.

En las gráficas de la *Figura 6-6*, se muestra la evolución del error tanto de las pérdidas de potencia activa como de potencia reactiva para diferentes potencias de carga  $S_C$ . En ambas gráficas el máximo error que se contempla con estas condiciones de desequilibrio es insignificante: 1,136 kW de error en las pérdidas de la potencia activa y 4,01 kVAr de error en las pérdidas de potencia reactiva. Nuevamente, el error aumenta conforme aumenta la potencia de carga. Sin embargo, estos errores pueden ser asumibles con el empleo del modelo monofásico del transformador, pues un error de 1,136 kW frente a una potencia aparente de carga de 1500 kVA es muy pequeño.

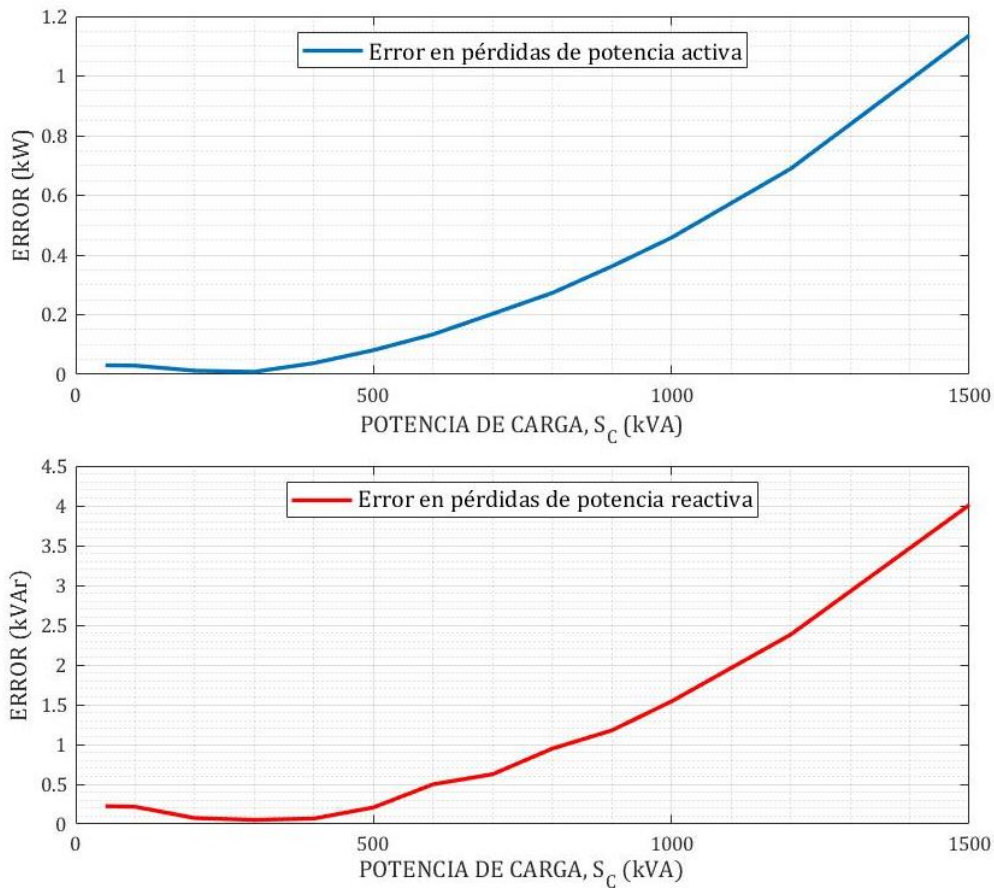


Figura 6-6. Diagrama de barras de los errores en pérdidas de potencia para distintos niveles de carga.  
Elaboración propia.

**D) Análisis del error cometido en pérdidas al aproximar la tensión monofásica equivalente procedente de un escenario con desequilibrio de tensiones.**

En el supuesto anterior al tener desequilibrios en la tensión del nudo slack, para construir los escenarios monofásicos equivalentes y determinar la tensión del nudo slack en ellos, se tiene que aplicar el *teorema de las componentes simétricas*. En este apartado se plantea prescindir de este teorema y aproximar la tensión del nudo slack de los escenarios monofásicos como la media de las tensiones desequilibradas de cada fase.

Para las condiciones del supuesto anterior, tras aplicar el teorema de las componentes simétricas la tensión del nudo slack en los escenarios monofásicos queda:

$$\vec{V}_{SLACK} = 0,98753 \angle 0,0073081 \text{ pu}$$

Sin embargo, si aproximamos esta tensión a la tensión media obtenemos una tensión del nudo slack para los escenarios monofásicos de la siguiente forma:

$$V_{SLACK} = (0,95 + 1 + 1,05) / 3 \text{ pu} \rightarrow \vec{V}_{SLACK} = 1 \angle 0 \text{ pu}$$



El objetivo aquí es analizar si este error puede ser asumible con el fin de evitar costes computacionales en el cálculo de la tensión del nudo slack mediante componentes simétricas.

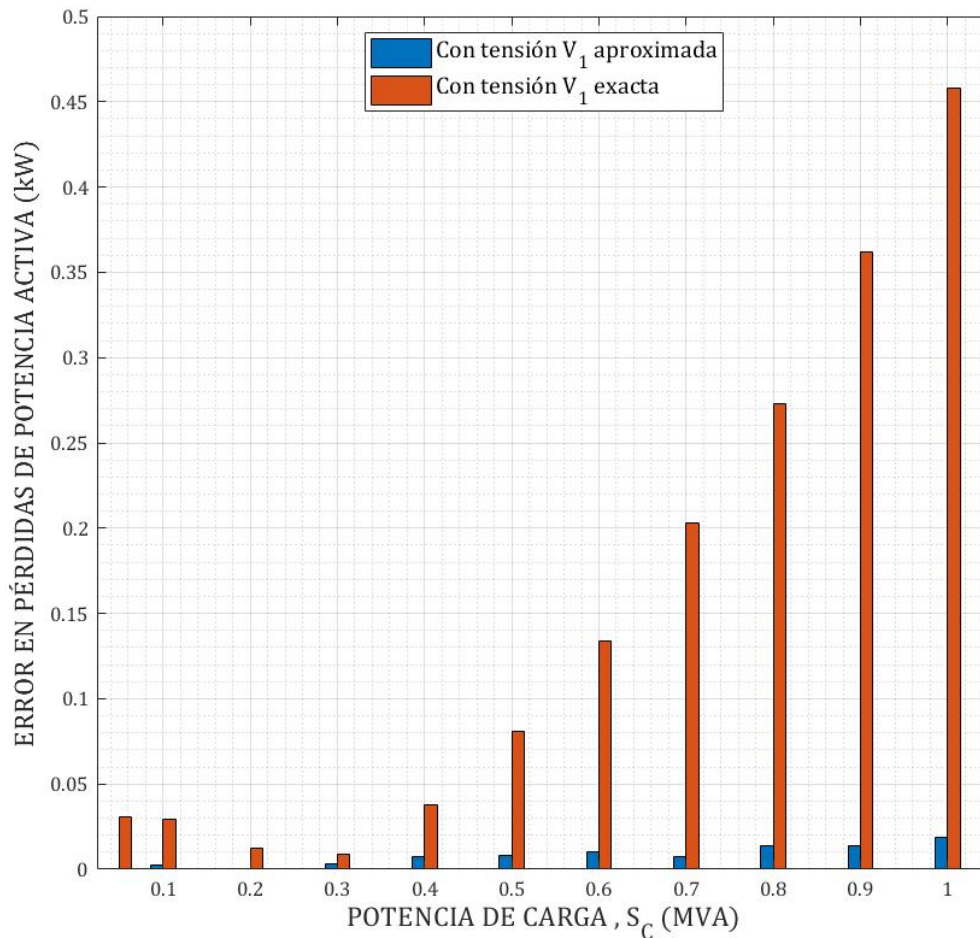


Figura 6-7. Diagrama que compara los errores en pérdidas en función de si la tensión del nudo slack del escenario monofásico es exacta o aproximada. Elaboración propia.

Como se observa en la *Figura 6-7*, la diferencia de los errores de pérdidas es bastante pronunciada en los últimos niveles de carga representados. Si se construyen los escenarios monofásicos equivalentes con una tensión del nudo slack aproximada se estaría asumiendo un error del orden de 600 W para un nivel de carga de 1 MVA.

#### E) Análisis de las pérdidas de potencia y errores de tensión en escenarios trifásicos desequilibrados por el factor de potencia de la carga en comparación con sus escenarios monofásicos equivalentes.

En este último apartado, se van a estudiar las consecuencias de imponer un factor de potencia diferente en una fase del nudo 2. Por una parte, se estudia el consecuente desequilibrio de la tensión del nudo 2 y; por otro lado, se estudia el error que se comete en la potencia al asumir un modelo monofásico.

En la gráfica de la *Figura 6-8* se ha plasmado el desequilibrio de tensión existente entre las fases del nudo 2 como consecuencia de imponer en una fase un factor de potencia diferente (para las fases S y T un f.d.p. de 1 y para la fase R un f.d.p. de 0,8). Para los escenarios con subtensión (19 kV) estos desequilibrios son mayores. Aún así, el máximo desequilibrio que se muestra en el diagrama es de 21 V aproximadamente. Si tenemos en cuenta que la tensión nominal en el nudo 2 es de 420 V, este desequilibrio supone un 5% aproximadamente de la tensión nominal, luego, puede asumirse.

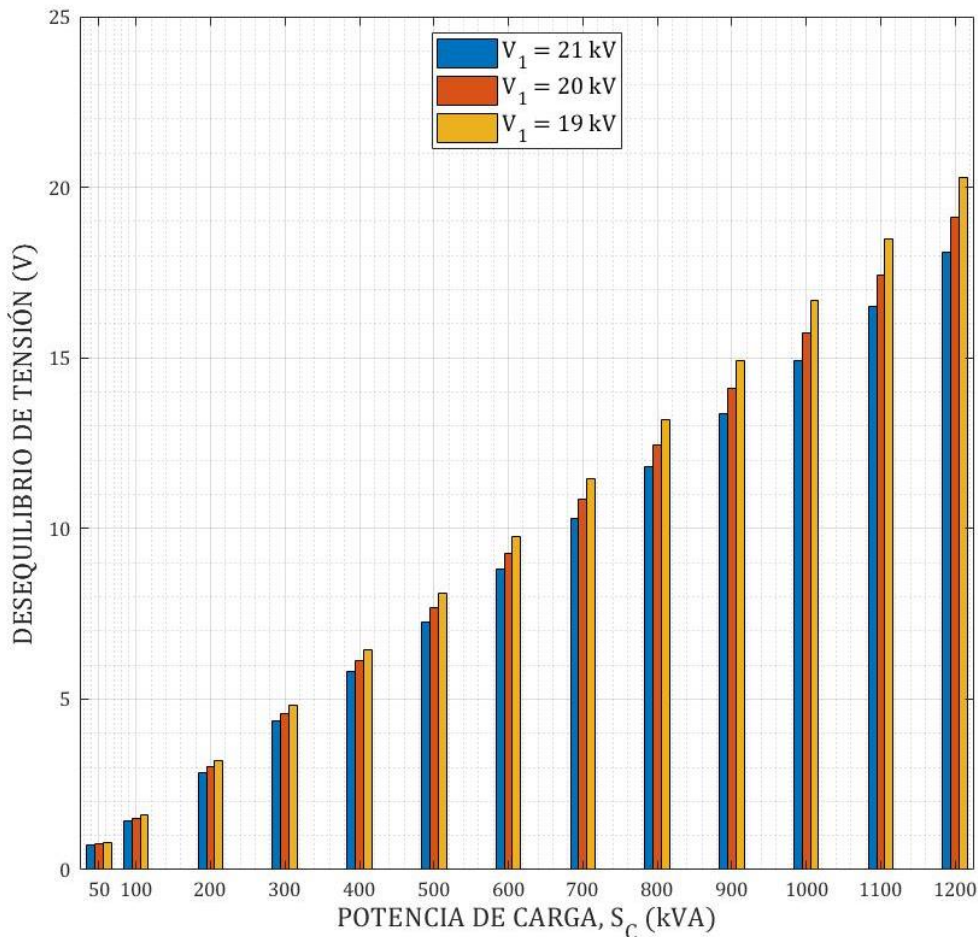


Figura 6-8. Diagrama que compara el desequilibrio de tensión entre las fases del nudo 2 para distintas tensiones del nudo slack. Elaboración propia.

En las siguientes gráficas, plasmadas en la *Figura 6-9*, se muestra la evolución del error en las pérdidas de potencia para esta situación concreta de desequilibrio entre los factores de potencia para una tensión nominal del nudo slack. Nuevamente, el error en las pérdidas de potencia crece conforme aumenta la potencia de carga. Sin embargo, para una sobrecarga del 90% el error es apenas 2,5 kW y 9 kVAr aproximadamente. Esto es, el error en pérdidas de potencia activa supone 0,2083% de la potencia total y el error en las pérdidas de potencia reactiva supone un 0,75%, teniendo en cuenta que la potencia total es 1200 kVA.

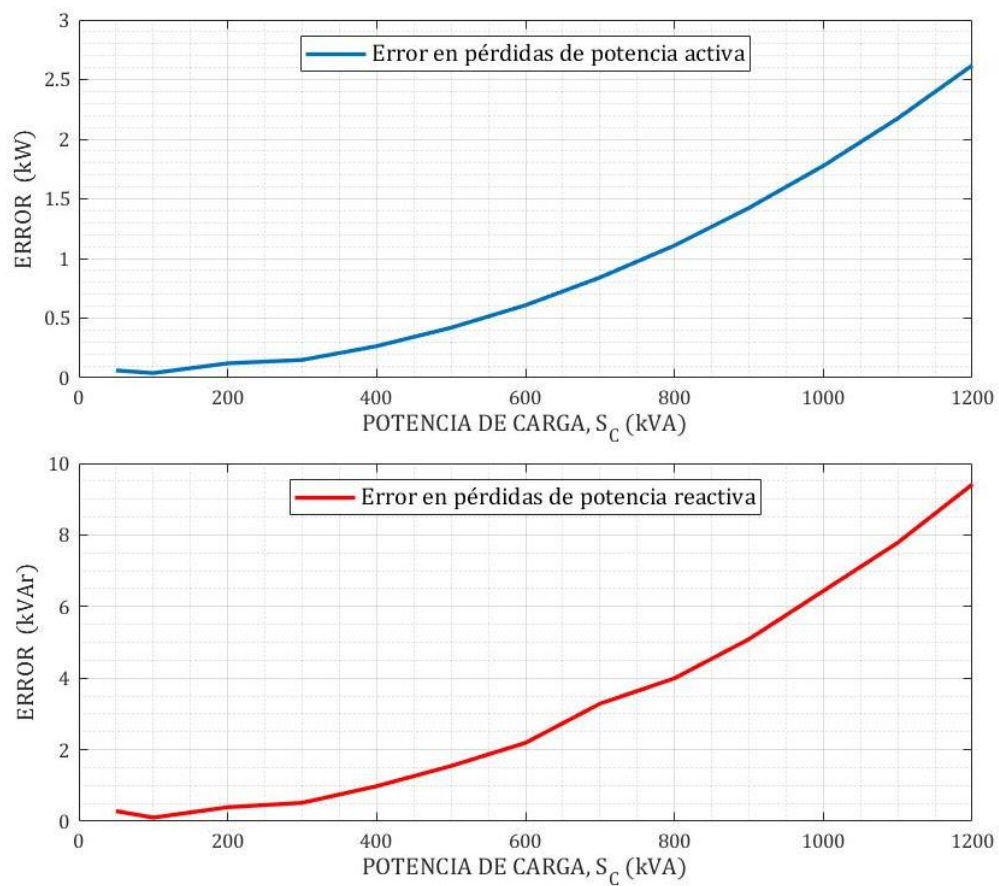


Figura 6-9. Gráfica de la evolución del error en las pérdidas de potencia para una tensión nominal. Elaboración propia.



## 7 VALIDACIÓN DEL MODELO DE TRANSFORMADOR

Para validar el modelo del transformador empleado en este estudio, y así también las conclusiones obtenidas, se debe comprobar que los resultados de las simulaciones de este modelo son coherentes con los obtenidos en los ensayos realizados en el laboratorio de alta tensión (documento incluido en el *Anexo*).

En los ensayos de vacío realizados en el laboratorio de alta tensión, las pérdidas en el hierro para la tensión nominal del transformador son 1264,65 W y para una sobretensión del 10% estas pérdidas ascienden a 1729,72 W, *Tabla 7-1*.

Tabla 7-1. Ensayo de vacío realizado en el laboratorio de alta tensión.

ENSAYO DE VACIO							
	TENSION	u	v	w	Io	Io %	Pfe
100 %	420	11.050	8.500	11.290	10,28	1,19	1.264,65
110 %	462	33.730	29.750	34.740	32,74	3,78	1.729,72

Por otra parte, las simulaciones con el modelo de transformador implementado dan unas pérdidas en el hierro para su tensión nominal de 1264 W, es decir, prácticamente las mismas pérdidas obtenidas en el ensayo de vacío del laboratorio. Sin embargo, para una tensión un 10% superior a la nominal, las simulaciones arrojan unas pérdidas de potencia en el hierro de 1529,4 W. Luego, en este caso existe un error del 11,58% entre las pérdidas del hierro obtenidas con los ensayos del laboratorio y las obtenidas con las simulaciones del modelo.

Las pérdidas en el hierro se generan por histéresis y por corrientes de Foucault. La circulación de las intensidades de excitación del transformador presenta una característica fuertemente no lineal dependiendo de la curva de saturación según el comportamiento del material ferromagnético del núcleo del transformador. El efecto de saturación se puede observar más claramente en la curva de magnetización de la *Figura 7-1*. Al subir un 10% la tensión de alimentación el punto de funcionamiento se acerca o incluso supera el codo de saturación. Por esta razón, la intensidad de excitación aumenta significativamente.

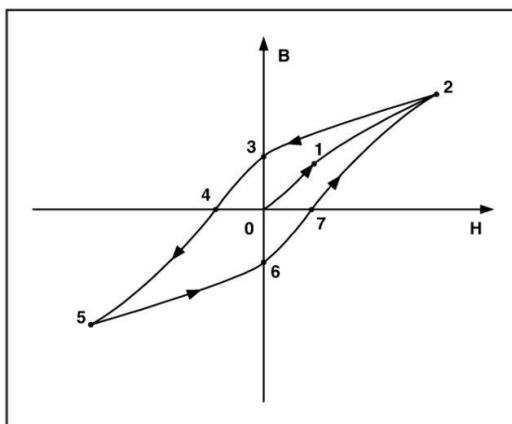


Figura 7-1. Ciclo de histéresis o magnetización [9].

Sin embargo, como el modelo del transformador empleado es de parámetros constantes, no considera las ramas de magnetización con impedancia variable ni la variación de la resistencia con la temperatura. Luego, el modelo queda validado, pero con las limitaciones que se acaban de nombrar.

## 8 CONCLUSIONES

El objetivo de este trabajo es estudiar en qué condiciones emplear un modelo monofásico de transformador presenta más errores en las pérdidas de potencia que un modelo trifásico de transformador. En condiciones de equilibrio ambos modelos presentan las mismas pérdidas de potencia activa y reactiva. Sin embargo, cuando las condiciones que se dan son desequilibradas aparecen errores en las pérdidas que hacen que un modelo de transformador trifásico se ajuste mejor a la realidad. Las conclusiones obtenidas a partir de los resultados de las simulaciones son las siguientes:

- En escenarios con condiciones equilibradas, en el modelo monofásico y en el modelo trifásico se producen las mismas pérdidas de potencia. Luego, para las situaciones equilibradas un modelo monofásico de transformador se ajusta a la realidad.
- En escenarios con desequilibrios de potencia de carga, cuanto mayor es la potencia de carga, mayores son las pérdidas de potencia y como consecuencia, mayor es el error que se comete. Y para un mismo nivel de desequilibrio entre las fases, cuanto mayor potencia de carga, mayores errores en las pérdidas de potencia se comenten.

Sin embargo, para un desequilibrio del 20% el error en pérdidas de potencia que se comete es aproximadamente del 2,5% para una potencia con sobrecarga del 20% (756 kVA) y un 2% para una potencia de carga nominal (630 kVA). Es decir, para desequilibrios moderados los errores en pérdidas, tanto de potencia activa como de potencia reactiva, no son significativos. Para desequilibrios por encima del 50% los errores que se comenten alcanzan más del 10%. En estos casos emplear un modelo monofásico de transformador es inadmisibles.

- En escenarios con desequilibrios en la tensión del nudo slack, cuanto mayor es la potencia de carga, mayor es el error cometido por el modelo monofásico. Sin embargo, el error que se comete puede ser asumible porque es relativamente pequeño en comparación a la tensión nominal del transformador. En estos casos un modelo monofásico de transformador se aproxima de forma aceptable a los resultados obtenidos con el modelo trifásico.

### 8.1 Posibilidades de mejora

Aunque el modelo del transformador implementado arroja resultados muy aproximados a la realidad, los resultados podrían ser aún más exactos si se construyese un modelo de transformador que añadiese a su configuración los siguientes aspectos:

- Implementación de un modelo de transformador que considere las ramas de magnetización con impedancia variable, y la variación de la resistencia con la temperatura. Los ensayos de vacío tanto en el laboratorio como en las simulaciones arrojarían resultados con errores mínimos.
- Implementación de un modelo de transformador que tenga en cuenta la pequeña asimetría del transformador con tres columnas: el flujo de la columna central tiene un recorrido más corto y, por tanto, de menos reluctancia. En este nuevo modelo importa en qué fase se dan los desequilibrios, pues el mismo desequilibrio puede afectar a las magnitudes del transformador de forma diferente dependiendo de en qué fase se den.





---

## REFERENCIAS

---

- [1] [https://www.ree.es/sites/default/files/esquema\\_basico.pdf](https://www.ree.es/sites/default/files/esquema_basico.pdf)
- [2] Task Force C6.04. (2014). *Benchmark systems for network integration of renewable and distributed energy resources*. (575). Cigré.
- [3] Endesa Distribución. (2004). *Transformadores trifásicos para distribución en baja tensión* (Norma GE FND001).
- [4] Meco Guitiérrez, M. J. (2019). El transformador [apuntes de clase]. *Máquinas Eléctricas I*. Universidad de Málaga.
- [5] Das, J. C. (2016). *Understanding symmetrical components for power system modeling*. John Wiley and Sons, Inc. <https://doi.org/10.1002/9781119226895>
- [6] Guzmán Molina, S., & Pino López, J. C. del. (2021). *Análisis electromagnético de un transformador trifásico mediante el método de los elementos finitos*.
- [7] Pilar Quintana Hurtado, Marcos Lafoz Pastor. *Trabajo fin de grado*. Compensación de desequilibrios en redes eléctricas mediante convertidores electrónicos de potencia y redes de secuencia.
- [8] <http://materias.fi.uba.ar/6509/CompSim-Versi%F3n%2031-3-08.pdf>
- [9] Amalfa, S. (2007). *Transformadores fundamentos y construcción*. Editorial Hispano Americana HASA.



# ANEXOS

## A) ENSAYOS DE LABORATORIO DE ALTA TENSI

LABORATORIO DE ALTA TENSION							
CERTIFICADO DE ENSAYOS N° 67924050620				CALCULO N° NL21768/00			
NORMA ENDESA FND 001 2002				UNE 21.428-1-1 Y UNE EN 60.076			
NUMERO: 67924		TIPO: 630L/24/20 B2 O PA-GE-FND001		630 KVA		3 FASES	
A.T. (1)	20000V ±2.5 ±5 +10	18.18 A	B.T. (1)	420 V	866.02 A	FACTOR K= 1,00	
A.T. (2)	0V		B.T. (2)	0 V		FACTOR K2= 1,00	
A.T. (3)	0V						
CONEXION: Dyn11				CLASE TERMICA: A			
REFRIGERANTE: ACEITE		REFRIGERACION: ONAN		MASA TOTAL: 1804Kg		DEVANADO: CU-CU 50 HZ.	
<b>GARANTIAS</b>		Uk (%)	Pcu (W)	Pfe (W)	Io 100%	Io 110%	Imp. A.T.
		4,00	6500	1300	1,60	4,50	Lw (A) dB
							67
<b>RESULTADOS</b>							
20000/420		4.30	7225	1264	1.19	3.78	
<b>ENSAYO DE T. APLICADA</b>			<b>ENSAYO DE T. INDUCIDA</b>			<b>ENSAYO DE IMPULSOS</b>	
A.T. 50.00 Kv 60.00 Segundos			840.00 V 100 Hz			Tipo Rayo Onda Plena 1.25/50 µs	
B.T. 10.00 Kv 60.00 Segundos			60.00 Segundos			A.T. Kv B.T. Kv	
<b>ENSAYO DE VACIO</b>							
		TENSION	u	v	w	Io	Io %
100 %		420	11,050	8,500	11,290	10,28	1,19
110 %		462	33,730	29,750	34,740	32,74	3,78
<b>ENSAYO DE CORTOCIRCUITO</b> 25.34 °C							
20000/420		TENSION	V int	U	V	W	σ3
		852,97	850,91	18,150	18,204	18,318	18,224
							Pw
							6 216,48
							Pcu
							6190
<b>RESISTENCIAS</b>							
27 °C		A.T.	U-V(Ω)	V-W(Ω)	W-U(Ω)	B.T.	U-V(Ω)
		20000	7.1580000	7.1380000	7.1520000	420	0.0019960
		0				0	0.0019990
		0					0.0020430
<b>RELACION DE TRANSFORMACION</b>							
A.T.	B.T.	REL	%U	%V	%W	A.T.	B.T.
22000	420 /√3	90.73	0.37	0.48	0.70		
21000	420 /√3	86.60	0.55	0.55	0.55		
20500	420 /√3	84.54	0.70	0.82	0.70		
20000	420 /√3	82.48	0.87	0.62	0.99		
19500	420 /√3	80.42	1.04	1.04	1.16		
19000	420 /√3	78.36	1.09	1.09	1.22		

### CALCULO DE PERDIDAS Y TENSION DE CORTOCIRCUITO

20000/420		25.34 °C	75 °C
Pcu AT	3524	4196	
Pcu BT	2249	2679	
Pcu Adic	416	349	
Pcu Total	6190	7225	
Ur %	0,98	1,15	
Ux %	4,14	4,14	
Uk %	4,26	4,30	

TRANSFORMADOR EXENTO DE PCBs  
Observaciones