

Trabajo Fin de Máster

Ingeniería Eléctrica

Diseño de una red a escala de baja tensión y de un sistema de control y supervisión

Autor: Álvaro González Muñoz

Tutores: Esther Romero Ramos, José María Maza Ortega

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

Sevilla, 2022



Trabajo Fin de Máster
Ingeniería Eléctrica

Diseño de una red a escala de baja tensión y de un sistema de control y supervisión

Autor:

Álvaro González Muñoz

Tutores:

Esther Romero Ramos

Profesor titular

José María Maza Ortega

Profesor titular

Dpto. de Ingeniería Eléctrica
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla
Sevilla, 2022

Trabajo Fin de Máster: Diseño de una red a escala de baja tensión y de un sistema de control y supervisión

Autor: Álvaro González Muñoz

Tutor: Esther Romero Ramos, José María Maza Ortega

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

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2022

El Secretario del Tribunal

A mi familia

A mis maestros

Agradecimientos

A Ester y José María por la confianza depositada y por su disposición y ayuda en la realización de este trabajo.

A mis compañeros del Departamento de Ingeniería Eléctrica por sus consejos.

A mi familia, por su cariño y paciencia.

Álvaro González Muñoz

Sevilla, 2022

Resumen

El presente Trabajo de Fin de Máster está enmarcado en el proyecto de investigación titulado “HySGrid+: Desarrollo de comunidades locales energéticamente positivas con sistemas híbridos de generación renovable y almacenamiento”.

El avance en la transición hacia sistemas de energía eléctrica libres de emisiones forma parte de los objetivos principales del proyecto, por lo que ahondar en el conocimiento teórico y práctico de los sistemas de gestión de redes de distribución resulta fundamental para tal fin.

Por ello, en este trabajo se modelará y caracterizará una red de baja tensión que sirva como escenario de red de distribución y que podrá sumarse a la infraestructura de redes disponibles en el Departamento de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de Sevilla. Por otro lado, se diseñará un sistema que permita la supervisión y control de las redes en tiempo real, facilitando el análisis de los sistemas en operación.

Abstract

The present work is framed within the research project named “Hysgrid: Desarrollo de comunidades locales energéticamente positivas con sistemas híbridos de generación renovable y almacenamiento”.

Progress towards electrical systems with no emissions is part of the project’s main objectives. In this respect, to deepen in the theoretical and practical knowledge of the management of distribution networks systems is fundamental.

For this purpose, in this document a low voltage distribution network will be modelled and characterized for the purpose of be added to the network infrastructure available in the Department of Electrical Engineering of the University of Seville. In addition, a supervision and control system will be designed in order to manage networks in real time, facilitating the analysis of the systems in operation.

Índice

Agradecimientos	ix
Resumen	xi
Abstract	xiii
Índice	xv
Índice de Tablas	xvii
Índice de Figuras	xix
Notación	i
1 Introducción y objetivos	1
1.1 Objetivos	2
1.2 Estructura del trabajo	2
2 Modelado de la red de baja tensión	3
2.1 Características originales de la red comercial	4
2.2 Adaptación de la red comercial	5
2.2.1 Redistribución de cargas	6
2.2.2 Escalado de la red	10
2.3 Características reales del feeder	12
2.3.1 Longitudes de líneas	13
2.3.2 Distancia entre conductores	14
2.4 Modelado del transformador trifásico	16
2.4.1 Características reales del transformador	17
2.4.2 Matriz de admitancias del transformador	18
2.5 Comparación de redes	20
3 Acoplamiento magnético	23
3.1 Efecto del acoplamiento magnético	23
3.2 Adaptación del acoplamiento en la red	25
3.2.1 Primera simplificación	26
3.2.2 Segunda simplificación	30
3.2.3 Tercera simplificación	32
3.2.4 Convertidores adicionales	32
4 Sistema de supervisión, control y adquisición de datos de redes a escala	35
4.1 Motivación de la implementación de un SCADA	35
4.2 Arquitectura del sistema SCADA	36
4.2.1 Controlador lógico programable (PLC)	37

4.2.2	Analizador de red	37
4.2.3	Ordenador con SCADA	38
4.3	Funcionalidades del SCADA	39
5	Particularización del Scada de la red residencial	41
5.1	Red residencial	41
5.2	Software	42
5.2.1	Citect Studio	42
5.2.2	Gestor de diseño	46
5.3	Funcionalidades implementadas en el SCADA	46
5.3.1	Pantalla de inicio	48
5.3.2	Pantalla de configuración de ensayos	49
5.3.3	Pantalla de monitorización	54
6	Conclusiones y líneas futuras	59
	Anexo I	61
	Anexo II	79
	Referencias	85

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2–1. Conexión, longitud y conductor de las ramas de la subred comercial [4].	4
Tabla 2–2. Matrices de impedancias de conductores aéreos.	5
Tabla 2–3. Cargas de la subred comercial.	5
Tabla 2–4. Matrices diagonales de impedancias de conductores aéreos.	8
Tabla 2–5. Impedancias teóricas de cada rama de la red comercial.	9
Tabla 2–6. Parámetros de transformador para red europea de BT.	9
Tabla 2–7. Cargas originales y escaladas en la red comercial.	11
Tabla 2–8. Cargas originales y escaladas por la red que se simulará en los laboratorios.	12
Tabla 2–9. Valores teóricos de impedancia escalada para cada una de las ramas de la red comercial.	13
Tabla 2–10. Valores teóricos y comerciales de R y L de cada rama.	14
Tabla 2–11. Longitudes originales y emuladas de cada rama.	14
Tabla 2–12. Separación de conductores originales y emuladas de cada rama.	15
Tabla 2–13. Características del transformador que se utilizará en el feeder comercial.	17
Tabla 2–14. Resultados del ensayo de cortocircuito.	17
Tabla 2–15. Resultados del ensayo de vacío.	17
Tabla 2–16. Parámetros del circuito equivalente del transformador.	17
Tabla 2–17. Escenarios de repartos de cargas entre fases para la comparación de las redes teórica y modelada.	20
Tabla 2–18. Matrices de impedancias de la red comercial caracterizada.	20
Tabla 3–1. Factores k_1 , k_2 , k_3 y k_4 para conductores subterráneos (UG) y aéreos (OH).	26
Tabla 3–2. Escenarios de reparto de cargas entre fases.	27
Tabla 3–3. Errores máximos absolutos de tensión al desprestigiar el acoplamiento en el neutro ante un escenario equilibrado de reparto de cargas.	28
Tabla 3–4. Errores promedios de tensión al desprestigiar el acoplamiento en el neutro ante un escenario equilibrado de reparto de cargas.	28
Tabla 3–5. Errores máximos absolutos de tensión al desprestigiar el acoplamiento en el neutro ante un escenario con desequilibrio medio de cargas.	29
Tabla 3–6. Errores promedios de tensión al desprestigiar el acoplamiento en el neutro ante un escenario con desequilibrio medio de cargas.	29
Tabla 3–7. Errores máximos absolutos de tensión al desprestigiar el acoplamiento en el neutro ante un escenario con desequilibrio extremo de cargas.	30
Tabla 3–8. Errores promedios de tensión al desprestigiar el acoplamiento en el neutro ante un escenario	

con desequilibrio extremo de cargas.	30
Tabla 3–9. Errores máximos absolutos de tensión ante distintos escenarios de reparto de cargas considerando acoplamiento en los nudos con carga y nudo 2.	31
Tabla 3–10. Errores promedios máximos de tensión ante distintos escenarios de reparto de cargas considerando acoplamiento en los nudos con carga y nudo 2.	31
Tabla 3–11. Errores máximos absolutos de tensión ante distintos escenarios de reparto de cargas si se desprecia el efecto del acoplamiento en toda la red.	32
Tabla 3–12. Errores promedios máximos de tensión ante distintos escenarios de reparto de cargas si se desprecia el efecto del acoplamiento en toda la red.	32
Tabla 3–13. Errores máximos absolutos de tensión si se añaden convertidores adicionales.	33
Tabla 3–14. Errores promedios máximos de tensión si se añaden convertidores adicionales.	33
Tabla 4–1. Transformadores de corrientes utilizados en las redes a escala.	38
Tabla 5–1. Tipos de tags de variable.	44
Tabla A–1. Rango de memoria según el tipo de dato en comunicaciones Modbus.	79
Tabla A–2. Mapa de direcciones de las variables de las centrales de medida.	79
Tabla A–3. Mapa de direcciones de las variables de los PLCs de los OLEs.	80
Tabla A–4. Mapa de direcciones de las variables de los PLCs de los VSGs.	81

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2-1. Redes de media y baja tensión a escala.	3
Figura 2-2. Redes benchmark residencial, industrial y comercial.	4
Figura 2-3. Esquema unifilar de la red comercial.	6
Figura 2-4. Simplificación de tramo de línea entre nudos $i-j$.	7
Figura 2-5. Red comercial con redistribución de cargas.	10
Figura 2-6. Red comercial con redistribución de cargas.	12
Figura 2-7. Disposición de conductores aéreos sobre poste.	13
Figura 2-8. Circuito equivalente de un transformador monofásico.	16
Figura 2-9. Circuito equivalente de un transformador trifásico Dyg.	18
Figura 2-10. Comparación de la caída de tensión en la red teórica y modelada para cargas equilibradas.	21
Figura 2-11. Comparación de la caída de tensión en la red teórica y modelada para cargas desequilibradas.	22
Figura 3-1. Simulación del acoplamiento magnético entre fases de la rama $i-j$ mediante FTDIs.	24
Figura 3-2. Simulación del acoplamiento magnético entre fases de la rama $i-j$ mediante FIDIs.	25
Figura 3-3. Simulación del acoplamiento magnético de las fases a, b y c.	26
Figura 3-4. Perfiles de consumo en los nudos con carga aplicando FEL.	27
Figura 3-5. Red comercial con FIDIs en nudo 2 y nudos con carga.	31
Figura 3-6. Simulación de acoplamiento magnético en los nudos 2, 3, 4, 5 y 6, y nudos con cargas.	34
Figura 4-1. Arquitectura del sistema SCADA.	36
Figura 4-2. PLC TM241CEC24T de Schneider.	37
Figura 4-3. Pantalla Harmony HMISTM6400 de Schneider.	37
Figura 4-4. Analizador de red PowerLogic PM5300.	38
Figura 5-1. Esquema unifilar simplificado de la red residencial de BT.	41
Figura 5-2. Conexión de OLEs y VSC Balance en la red residencial.	42
Figura 5-3. Menú de configuración de dispositivos externos.	43
Figura 5-4. Configuración del protocolo de comunicación del dispositivo externo.	43
Figura 5-5. Configuración de comunicación del dispositivo externo.	44
Figura 5-6. Menú de configuración de usuarios y roles.	45
Figura 5-7. Editor Cicode.	45

Figura 5-8. Barra de herramientas del Gestor de diseño.	46
Figura 5-9. Diagrama de flujos de la aplicación del SCADA.	47
Figura 5-10. Menú inicial de selección de redes de baja tensión.	48
Figura 5-11. Menú inicial de selección de redes híbridas.	48
Figura 5-12. Vista inicial de la pantalla de configuración de ensayos.	49
Figura 5-13. Menú de configuración de ensayos automáticos.	50
Figura 5-14. Estructura de un archivo de ensayo automático.	50
Figura 5-15. Perfiles de potencia activa del archivo de ensayo.	51
Figura 5-16. Información de equipos en cada nudo.	51
Figura 5-17. Información del ensayo automático y controles de inicio y parada.	52
Figura 5-18. Pantalla completa de configuración de ensayo automático.	53
Figura 5-19. Menú de configuración de consignas de un OLE y un VSG en un ensayo manual.	53
Figura 5-20. Pantalla completa de configuración de ensayo manual.	54
Figura 5-21. Esquema unifilar de la red residencial en el SCADA.	55
Figura 5-22. Lecturas de corrientes por la rama y medidas de tensión en los nudos extremos, y estado de la red.	55
Figura 5-23. Lecturas de potencias, tensión y corriente de los convertidores.	56
Figura 5-24. Gráficos de tendencia de tensiones y corrientes.	56
Figura 5-25. Ventana de configuración de exportación de datos.	57
Figura 5-26. Pantalla de monitorización completa.	57

Notación

U_{ik}	Tensión en el nudo i de la fase k
I_k	Intensidad de la fase k
Z_{ii}	Impedancia de propia de la fase i
Z_{ij}	Impedancia de acoplamiento en la fase i producida por el paso de corriente en la fase j
Z_p	Impedancia propia
Z_m	Impedancia mutua
$FTDI_k$	Fuente de tensión dependiente de intensidad de la fase k
$FIDI_k$	Fuente de intensidad dependiente de intensidad de la fase k
I^*	Conjugado de I
A^T	Matriz traspuesta de A

1 INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

El presente Trabajo de Fin de Máster está enmarcado en el proyecto de investigación titulado “HySGrid+: Desarrollo de comunidades locales energéticamente positivas con sistemas híbridos de generación renovable y almacenamiento”, financiado por Ministerio de Ciencia e Innovación de España. Con él se pretende avanzar en la transición hacia los sistemas de energía eléctrica libres de emisiones en los que las fuentes renovables, la generación distribuida y los sistemas de almacenamiento puedan convivir. No obstante, esta transición no estará exenta de retos.

La reducción de la emisión de gases de efecto invernadero, el aumento de la producción de energía a partir de fuentes renovables y la mejora de la eficiencia energética de los sistemas eléctricos, son los principales objetivos marcados por la Unión Europea (UE) para el año 2030 [1]. En esta línea, el desarrollo de sistemas energéticos sostenibles que incorporen nuevas fuentes de generación y recursos, jugarán un papel especialmente importante para poder alcanzarlos.

Factores como el auge del vehículo eléctrico, el crecimiento de la generación descentralizada o el uso de sistemas de almacenamiento de energía, son claros indicadores que apuntan a un cambio evidente en el paradigma de las redes eléctricas de distribución [2] [3]. Sin embargo, la eliminación de fuentes tradicionales de generación flexible pone de manifiesto uno de los grandes desafíos de los sistemas de energía eléctricos: el equilibrio entre generación y demanda.

Profundizar en el conocimiento, tanto en el plano teórico como práctico, de los sistemas de gestión de redes de distribución en los que cada vez más confluyen comunidades energéticas positivas, es uno de los objetivos del proyecto HySGrid. Como propuesta para ello, se pretende diseñar e implementar un ADMS (de sus siglas en inglés, *Advanced Distribution Management System*) que permita supervisar y gestionar de manera óptima la operación en tiempo real de redes de distribución.

Todo ello deberá ser desarrollado a nivel de laboratorio con la finalidad de poder evaluar cuestiones relevantes que estén relacionadas con la monitorización, sincronización y control de estas comunidades energéticas. Para ello, el Departamento de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de Sevilla cuenta en la actualidad con dos redes a escala de media y baja tensión. A su vez, se está trabajando en la ampliación de los sistemas disponibles, implementando una nueva red de baja tensión que pueda ser operada de manera aislada o conjunta con el sistema existente, de forma que se dispongan de nuevos escenarios de estudio de redes activas.

1.1 Objetivos

Con el fin de poner en práctica los objetivos del proyecto de investigación HySGrid, la infraestructura de los laboratorios del Departamento de Ingeniería Eléctrica está sufriendo un proceso de mejora. Se plantea para ello la instalación de una nueva red de baja tensión de tipo comercial que se añada a la red residencial de baja tensión existente.

El dimensionamiento, modelado y caracterización de dicha red a escala es uno de los objetivos principales de este trabajo. Para ello, se tomará como referencia la red propuesta por el Consejo Internacional de Grandes Redes Eléctricas (CIGRE), y se realizarán las adaptaciones pertinentes para ajustarla a las limitaciones de los laboratorios de la universidad. A su vez, se deberán optimizar los recursos existentes, lo cual será relevante para la adquisición de los elementos necesarios para su posterior implementación física.

Por otro lado, se pretende mejorar la supervisión, control y coordinación, tanto de las redes que se encuentran actualmente instaladas en los laboratorios, como de sus futuras ampliaciones. Lo que se persigue con esto es el desarrollo de un ADMS que ofrezca a las redes la capacidad de poder gestionar los recursos disponibles, con el propósito de optimizar la operación del sistema y que, a su vez, pueda actuar de manera eficiente ante contingencias que no estén previstas.

La naturaleza de estas contingencias puede ser variada, pudiendo estar relacionadas con cambios bruscos en la generación o demanda, o con pérdidas de parte del sistema que requieran de actuaciones eficaces para asegurar el servicio en la red, o que puedan implicar el funcionamiento aislado del sistema. Para ello, se deberán gestionar recursos como condensadores o compensadores síncronos estáticos (STATCOM), cambio de tomas de transformadores, sistemas de almacenamiento de energía, etc.

En consecuencia, el segundo objetivo de este trabajo es el desarrollo e implementación de un Sistema de Supervisión, Control y Adquisición de Datos (de sus siglas en inglés, SCADA), que facilite la monitorización de las redes en tiempo real, permitiendo así analizar el estado en el que se encuentra el sistema y poder tomar decisiones sobre él.

1.2 Estructura del trabajo

Para abarcar los objetivos mencionados, el trabajo seguirá la siguiente estructura:

- En el Capítulo 2 se presentará la red de referencia que se va a modelar para ser instalada en los laboratorios de la Universidad de Sevilla. Al mismo tiempo, se detallarán las modificaciones que deban realizarse para su escalado y adaptación, solventando así algunas limitaciones de los recursos disponibles. Posteriormente, se modelarán los parámetros de las líneas y del transformador que se utilizará en el montaje final de la red con el fin de obtener un modelo exacto del sistema a instalar. Por último, se estudiará la similitud de la red teórica y la red modelada.
- En el Capítulo 3 se estudia el efecto del acoplamiento magnético entre conductores debido al paso de la corriente eléctrica. En función de los recursos disponibles, se realizarán simplificaciones para simular dicho efecto y se cuantificarán sus errores con el fin adoptar la solución que más se aproxime al modelo exacto de la red.
- En el Capítulo 4 se presenta el sistema SCADA que se implementará para la supervisión y control de las redes, la arquitectura y características de los equipos que la componen y el protocolo de comunicación que utilizarán. Posteriormente, se especificarán las funcionalidades que deberá poseer dicha herramienta y las diferentes redes que podrán controlarse.
- En el Capítulo 5 se presentará la primera versión del SCADA diseñado para la supervisión y control de la red residencial de baja tensión instalada en los laboratorios, y se comentarán las funcionalidades implementadas mediante el análisis de la aplicación desarrollada.
- Por último, en el Capítulo 6 se exponen las conclusiones y contribuciones del trabajo realizado, así como las líneas de trabajo futuras.

2 MODELADO DE LA RED DE BAJA TENSION

Uno de los objetivos propuestos anteriormente es la adaptación, modelado y caracterización de una red a escala de baja tensión (BT). Dicha red será montada en los laboratorios del Departamento de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de Sevilla, los cuales ya cuentan con dos redes a escala: una que emula una red de media tensión (MT); y otra que emula un feeder residencial de BT (Figura 2-1).



Figura 2-1. Redes de media y baja tensión a escala.

Al igual que se hizo con el modelado de la subred residencial, se ha considerado el modelo de red europea de BT propuesto por el Consejo Internacional de Grandes Redes Eléctricas (CIGRE) [4]. Como se puede observar en la Figura 2-2, la red está compuesta por tres líneas de alimentación de tipo radial o feeder. Si se observa de izquierda a derecha, cada alimentador representa líneas con cargas residenciales, industriales y comerciales respectivamente. Todos ellos se encuentran conectados a una línea de MT de 20 kV de tensión de línea a través de unos transformadores de MT/BT. Cabe indicar que, al tratarse de una red de BT europea, la tensión de línea de cada uno de los alimentadores es de 400 V y la frecuencia de 50 Hz.

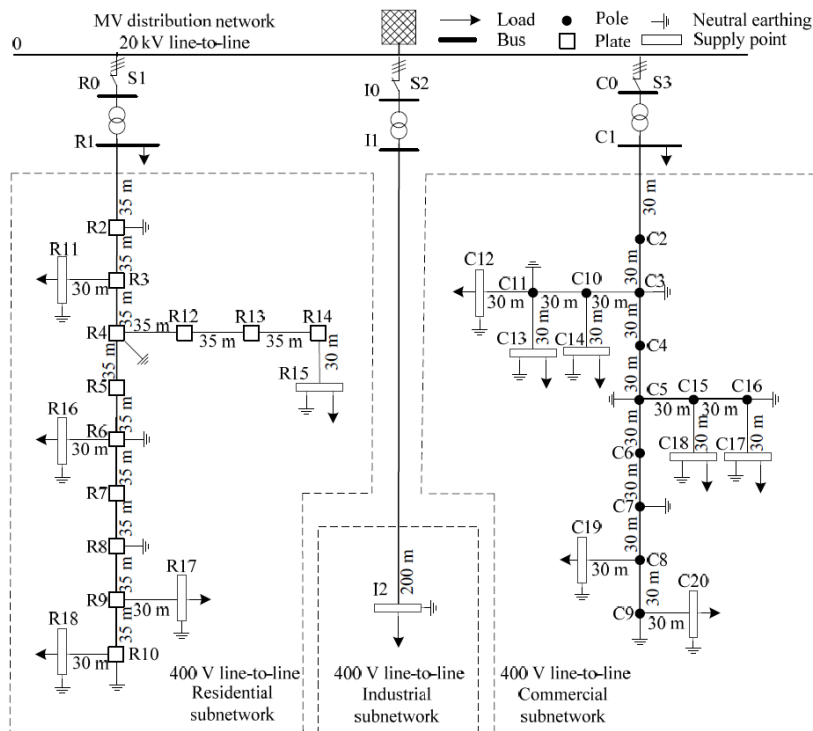


Figura 2-2. Redes benchmark residencial, industrial y comercial.

2.1 Características originales de la red comercial

La red de BT que se va a modelar en este trabajo para su posterior implementación física, está diseñada para que simule cargas de tipo comercial. Se trata de una red con conductores aéreos y, como se puede apreciar en la Figura 2-2, cuenta con un total de 20 nudos y 7 cargas distribuidas a lo largo del feeder. En la Tabla 2-1 se indican los nudos iniciales y finales de los tramos de línea de la red, su longitud y el tipo de conductor aéreo.

Tabla 2-1. Conexión, longitud y conductor de las ramas de la subred comercial [4].

Rama	Nudo inicial	Nudo final	Longitud (m)	Tipo de conductor
1	1	2	30	OH1
2	2	3	30	OH1
3	3	4	30	OH1
4	4	5	30	OH1
5	5	6	30	OH1
6	6	7	30	OH1
7	7	8	30	OH1
8	8	9	30	OH1
9	3	10	30	OH2
10	10	11	30	OH2
11	11	12	30	OH3
12	11	13	30	OH3
13	10	14	30	OH3
14	5	15	30	OH2
15	15	16	30	OH2
16	16	17	30	OH3
17	15	18	30	OH3
18	8	19	30	OH3
19	9	20	30	OH3

Los conductores OH1, OH2 y OH3 que conforman la red son de aluminio y con secciones de 70, 25 y 16 mm², respectivamente. En la Tabla 2-2 se muestran las matrices de impedancias de cada uno de ellos obtenidos de [4]:

Tabla 2-2. Matrices de impedancias de conductores aéreos.

Tipo conductor		Matriz de impedancias primitiva (Ω/km)			
		A	B	C	N
OH1	A	$0,540 + 0,777j$	$0,049 + 0,505j$	$0,049 + 0,462j$	$0,049 + 0,436j$
	B	$0,049 + 0,505j$	$0,540 + 0,777j$	$0,049 + 0,505j$	$0,049 + 0,462j$
	C	$0,049 + 0,462j$	$0,049 + 0,505j$	$0,540 + 0,777j$	$0,049 + 0,505j$
	N	$0,049 + 0,436j$	$0,049 + 0,462j$	$0,049 + 0,505j$	$0,540 + 0,777j$
OH2	A	$1,369 + 0,812j$	$0,049 + 0,505j$	$0,049 + 0,462j$	$0,049 + 0,436j$
	B	$0,049 + 0,505j$	$1,369 + 0,812j$	$0,049 + 0,505j$	$0,049 + 0,462j$
	C	$0,049 + 0,462j$	$0,049 + 0,505j$	$1,369 + 0,812j$	$0,049 + 0,505j$
	N	$0,049 + 0,436j$	$0,049 + 0,462j$	$0,049 + 0,505j$	$1,369 + 0,812j$
OH3	A	$2,065 + 0,825j$	$0,049 + 0,505j$	$0,049 + 0,462j$	$0,049 + 0,436j$
	B	$0,049 + 0,505j$	$2,065 + 0,825j$	$0,049 + 0,505j$	$0,049 + 0,462j$
	C	$0,049 + 0,462j$	$0,049 + 0,505j$	$2,065 + 0,825j$	$0,049 + 0,505j$
	N	$0,049 + 0,436j$	$0,049 + 0,462j$	$0,049 + 0,505j$	$2,065 + 0,825j$

Como se puede apreciar, los conductores que conectan la red con las cargas (OH3), presentan una resistencia mayor que resto de conductores debido a que la sección disminuye conforme se acerca a los puntos de consumo.

Por otro lado, las cargas conectadas en la red tendrán las siguientes características nominales:

Tabla 2-3. Cargas de la subred comercial.

Nudo	S (kVA)	Factor de potencia
12	20	0,90
13	20	0,90
14	25	0,90
17	25	0,90
18	8	0,90
19	16	0,90
20	8	0,90

2.2 Adaptación de la red comercial

La subred comercial, tal y como se muestra en la Figura 2-2, puede ser representada de una forma más simplificada si se eliminan los nudos intermedios de los que no aparecen bifurcaciones de líneas o cargas conectadas. De esta manera, la red puede ser representada tal y como se muestra en la Figura 2-3.

Para poder emular las cargas, al que igual que se realizó en la red residencial de BT que se encuentra instalada en los laboratorios [5], se utilizarán convertidores en fuente de tensión o Voltage Source Converter (VSC). Dichos convertidores recibirían consignas de potencia activa y reactiva que controlarían la corriente a inyectar o absorber en el nudo según estuviesen funcionando como generador o carga. Para el filtrado de las corrientes que saldrían del VSC se utiliza un filtro LCL [6]. Al conjunto de VSC y filtro se le conoce como Emulador Universal de Cargas o Omnimode Load Emulator (OLE).

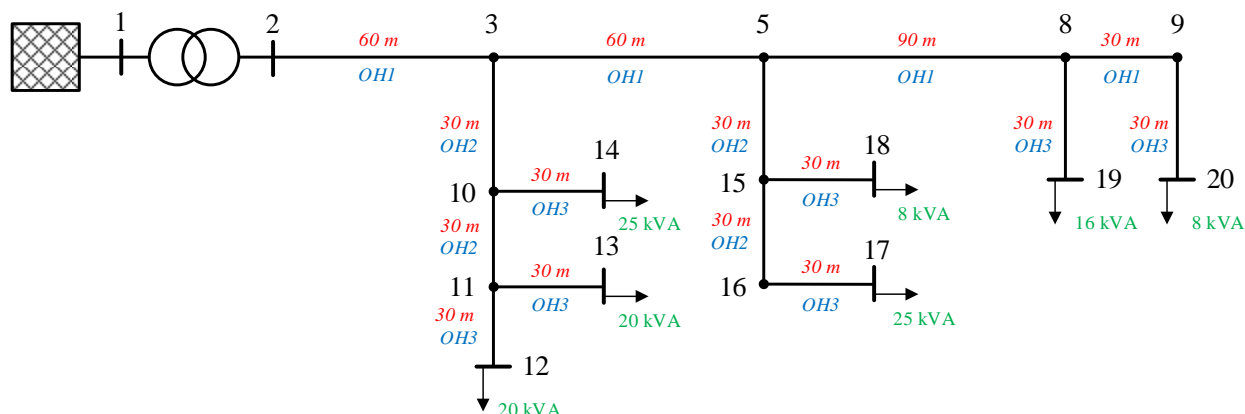


Figura 2-3. Esquema unifilar de la red comercial.

No obstante, el número de OLEs que se instalarán para reproducir la generación y el consumo de la red es limitado, por lo que no podrán emularse todas las cargas que propone la CIGRE. Por este motivo, será necesario reducir el número de cargas en el feeder. Para lograr dicho objetivo, será necesario redistribuir las cargas.

Tomando como referencia el feeder comercial de [4], en los siguientes apartados se estudiará la redistribución de algunas de las cargas propuestas y se analizarán qué adaptaciones habría que realizar sobre la red teórica para que pueda ser llevada a la práctica en los laboratorios. Por otro lado, se obtendrán los parámetros reales de los elementos que se utilizarán para emular las pérdidas por las líneas y se obtendrá un modelo del transformador trifásico que se empleará en el montaje real, pudiendo así parametrizar la red que finalmente se instalará en los laboratorios. Posteriormente se realizará una comparación entre la red teórica y la red caracterizada.

2.2.1 Redistribución de cargas

Como ya se ha indicado, el número de cargas que se simularán en la red está limitado por el número de convertidores que se podrán instalar en el laboratorio. En concreto serán cinco los equipos que podrán usarse en la red. Por este motivo, será necesario realizar agrupaciones de cargas. En concreto, se realizará la siguiente redistribución:

- Simplificación de la carga del nudo 18 (8 kVA) agrupándola con la carga del nudo 17 (25 kVA).
- Simplificación de la carga del nudo 13 (20 kVA) agrupándola con las cargas de los nudos 12 (20 kVA) y 14 (25 kVA).

Para poder llevar a cabo las distribuciones propuestas, se va a realizar de forma que se conserve la caída de tensión producida por la carga original. De esta forma se consigue que las cargas de la red equivalente tengan el mismo efecto que en la distribución inicial propuesta. A continuación, a modo de ejemplo, se muestra el cálculo para el agrupamiento de cargas en el nudo 17.

En primer lugar, se considera la red con una única carga equilibrada en el nudo 18 de 8 kVA y factor de potencia 0,9 inductivo (Tabla 2-3). Dado que las impedancias teóricas del transformador y de las líneas son conocidas, se puede calcular la tensión en dicho nudo.

Como se puede observar en la Tabla 2-2, las matrices de impedancia de las líneas representarían el acoplamiento entre cada una de las fases. Es decir, se trata de una matriz cuadrada en la que los elementos diagonales (Z_{ii}) representarían la impedancia del conductor de la fase i , y los elementos no diagonales (Z_{ij}) estarían representando la impedancia resultante del acoplamiento magnético producido en la fase i por la circulación de corriente en el conductor j (2-1).

$$Z = \begin{bmatrix} Z_{aa} & Z_{ab} & Z_{ac} & Z_{an} \\ Z_{ba} & Z_{bb} & Z_{bc} & Z_{bn} \\ Z_{ca} & Z_{cb} & Z_{cc} & Z_{cn} \\ Z_{na} & Z_{nb} & Z_{nc} & Z_{nn} \end{bmatrix} \quad (2-1)$$

Para simplificar los cálculos, en esta primera fase en la que solo se pretende obtener un reparto de las cargas a suprimir, la impedancia de acoplamiento entre fases se puede aproximar a una impedancia mutua (Z_m), igual al valor promedio de todos ellos:

$$Z_m = \frac{Z_{ab} + Z_{ac} + Z_{an} + Z_{bc} + Z_{bn} + Z_{cn}}{6} \quad (2-2)$$

Además, para el caso de los conductores aéreos propuestos, se cumple que $Z_{aa} = Z_{bb} = Z_{cc} = Z_{nn}$, por lo que la impedancia propia (Z_p) de los conductores es igual en todos los casos. Por consiguiente, la matriz de impedancias (2-1) se podría simplificar y reescribir como una matriz cuyos elementos diagonales estarían constituidos por los valores de Z_p y los elementos no diagonales por los valores Z_m .

$$Z = \begin{bmatrix} Z_p & Z_m & Z_m & Z_m \\ Z_m & Z_p & Z_m & Z_m \\ Z_m & Z_m & Z_p & Z_m \\ Z_m & Z_m & Z_m & Z_p \end{bmatrix} \quad (2-3)$$

Al mismo tiempo, dado que el neutro no se encuentra conectado a tierra, se debe cumplir que la suma de las corrientes por cada una de las fases y el neutro sea nula.

$$I_a + I_b + I_c + I_n = 0 \quad (2-4)$$

En la Figura 2-4 se muestra un esquema simplificado de un tramo de línea aérea. Considerando el acoplamiento entre cada una de las ramas se puede obtener el sistema de ecuaciones (2-5).

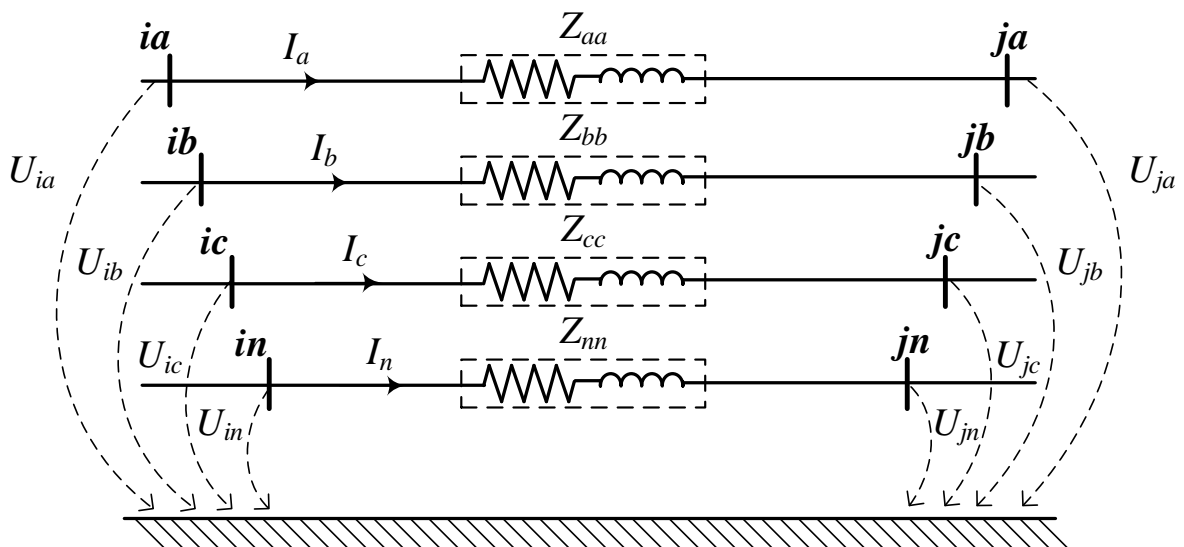


Figura 2-4. Simplificación de tramo de línea entre nudos i-j.

$$\begin{aligned}
 U_{ia} &= Z_p \cdot I_a + Z_m \cdot I_b + Z_m \cdot I_c + Z_m \cdot I_n + U_{ja} \\
 U_{ib} &= Z_m \cdot I_a + Z_p \cdot I_b + Z_m \cdot I_c + Z_m \cdot I_n + U_{jb} \\
 U_{ic} &= Z_m \cdot I_a + Z_m \cdot I_b + Z_p \cdot I_c + Z_m \cdot I_n + U_{jc} \\
 U_{in} &= Z_m \cdot I_a + Z_m \cdot I_b + Z_m \cdot I_c + Z_p \cdot I_n + U_{jn}
 \end{aligned}
 \tag{2-5}$$

Escribiendo la corriente del neutro en función del resto de intensidades, el sistema anterior se puede escribir de la siguiente manera:

$$\begin{aligned}
 U_{ia} &= (Z_p - Z_m) \cdot I_a + U_{ja} \\
 U_{ib} &= (Z_p - Z_m) \cdot I_b + U_{jb} \\
 U_{ic} &= (Z_p - Z_m) \cdot I_c + U_{jc} \\
 U_{in} &= (Z_m - Z_p) \cdot (I_a + I_b + I_c) + U_{jn}
 \end{aligned}
 \tag{2-6}$$

A partir de las ecuaciones anteriores se puede reescribir la matriz de impedancias simplificada (2-3) de la siguiente forma:

$$Z = \begin{bmatrix} Z_p - Z_m & 0 & 0 & 0 \\ 0 & Z_p - Z_m & 0 & 0 \\ 0 & 0 & Z_p - Z_m & 0 \\ 0 & 0 & 0 & Z_p - Z_m \end{bmatrix}
 \tag{2-7}$$

De este modo, la matriz diagonal de impedancias equivalente para cada uno de los conductores quedaría como se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 2-4. Matrices diagonales de impedancias de conductores aéreos.

Tipo conductor		Matriz diagonal de impedancias (Ω/km)			
		A	B	C	N
OH1	A	0,491 + 0,298j	0	0	0
	B	0	0,491 + 0,298j	0	0
	C	0	0	0,491 + 0,298j	0
	N	0	0	0	0,491 + 0,298j
OH2	A	1,320 + 0,333j	0	0	0
	B	0	1,320 + 0,333j	0	0
	C	0	0	1,320 + 0,333j	0
	N	0	0	0	1,320 + 0,333j
OH3	A	2,016 + 0,346j	0	0	0
	B	0	2,016 + 0,346j	0	0
	C	0	0	2,016 + 0,346j	0
	N	0	0	0	2,016 + 0,346j

Conocidas las longitudes de cada una de las ramas, los valores de las impedancias para cada uno de los tramos de líneas serían los siguientes:

Tabla 2–5. Impedancias teóricas de cada rama de la red comercial.

Rama	Tipo de conductor	Longitud (m)	$Z_p - Z_m (\Omega)$
3	OH1	60	0,0295 + 0,0179j
4	OH1	60	0,0295 + 0,0179j
5	OH1	90	0,0442 + 0,0268j
6	OH1	30	0,0147 + 0,0089j
7	OH2	30	0,0396 + 0,0100j
8	OH2	30	0,0396 + 0,0100j
9	OH2	60	0,0792 + 0,0200j
10	OH3	30	0,0605 + 0,0140j
11	OH3	30	0,0605 + 0,0140j
12	OH3	30	0,0605 + 0,0140j
13	OH3	30	0,0605 + 0,0140j
14	OH3	30	0,0605 + 0,0140j

Los parámetros del transformador que conecta la subred comercial con la red de MT son especificados en [4]:

Tabla 2–6. Parámetros de transformador para red europea de BT.

Grupo de conexión	V1 (kV)	V2 (kV)	Z (Ω)	S (kVA)
3-ph Dyn1	20	0.4	0,0053 + 0,00213j	300

La matriz de impedancias quedará de la siguiente forma:

$$Z_{trafo} = \begin{bmatrix} 5,3 + 21,3j & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 5,3 + 21,3j & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 5,3 + 21,3j & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot 10^{-3} (\Omega)$$

Realizando un flujo de cargas mediante el método de barrido del árbol, se obtienen las tensiones de fase en el nudo 18:

$$U_{an_{18}} = 228,82 \angle 0,01^\circ V$$

$$U_{bn_{18}} = 228,81 \angle -119,99^\circ V$$

$$U_{cn_{18}} = 228,82 \angle 120,01^\circ V$$

Ahora sería necesario calcular cuál sería la carga que habría que ubicar en el nudo 17 para que las tensiones de fase fueran las mismas. Tomando para ello una de las fases se puede obtener el valor de la potencia de dicha carga:

$$U_l = U_g - I \cdot Z_{linea} \quad (2-8)$$

$$I^* = \frac{S}{U_g} \quad (2-9)$$

Sustituyendo la expresión (2-9) en (2-8) se obtiene la potencia compleja conjugada para una de las fases en el nudo 17:

$$S_{a_{17}}^* = \frac{(U_g - U_{an_{18}}) \cdot U_g}{Z_{linea}} = \frac{(230 - 228,82 \angle 0,01^\circ) \cdot 230}{0,2039 + 0,0874j} = 2015,9 - 889,5j VA$$

La parte real de la potencia compleja representaría la potencia activa de una de las fases, mientras que la parte imaginaria indicaría la potencia reactiva. Conocida la potencia de una de las fases y el factor de potencia de la carga, se podrá obtener la potencia total que consume la carga:

$$S_{17} = \frac{P_{a17} \cdot 3}{fdp} = \frac{2015,9 \cdot 3}{0,9} = 6.719,67 \text{ VA} \approx 6,72 \text{ kVA}$$

La carga que habría que ubicar en el nudo 17 para obtener una caída de tensión similar a la que produce una carga de 8 kVA en el nudo 18, es de 6,72 kVA. De esta manera, la carga total en el nudo 17 sería de 32 kVA.

Para el caso de la carga del nudo 13, se decide dividir en dos la carga original. Es decir, se deberá incrementar la carga original de los nudos 12 y 14 por la equivalente que produce la misma caída de tensión que una carga de 10 kVA en el nudo 13. Siguiendo el mismo razonamiento que se ha empleado con la carga del nudo 17, se consiguen los siguientes resultados:

$$S_{12} = 10,12 \text{ kVA} \quad S_{14} = 12,66 \text{ kVA}$$

Tras el reparto de cargas, la red pierde dos ramas y algunos tramos de líneas modifican su longitud. En la siguiente figura se muestra el aspecto de la red tras haber realizado el reparto de cargas y renombrar los nudos de esta:

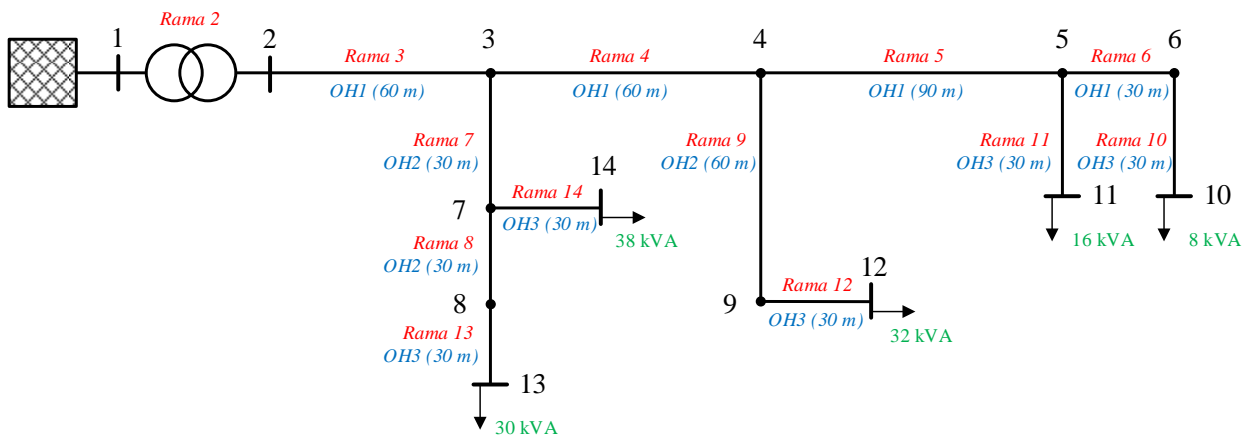


Figura 2-5. Red comercial con redistribución de cargas.

2.2.2 Escalado de la red

A la hora de evaluar si la red propuesta por la CIGRE puede ser representada en los laboratorios, se deberán atender a diversos factores. A continuación, se estudian cada uno de ellos por separado.

2.2.2.1 Nivel de tensión

Es necesario cuestionarse si el nivel de tensión al que trabaja la red puede ser llevado a la práctica. Al tratarse de una red de baja tensión a 400 V, no existe ningún problema para replicar dicho nivel de tensión en los laboratorios.

2.2.2.2 Potencias máximas y mínimas de los convertidores

Por otro lado, es importante tener en cuenta la potencia de los convertidores que emularán las distintas cargas de la red. Como ya se comentó anteriormente, los equipos que se emplearán para emular el consumo serán unos convertidores en fuente de tensión u OLEs. La carga máxima que pueden simular es de 28 kVA [5]. Dado que la mayoría de las cargas en la red superan dicho valor, será necesario escalar la magnitud de estas para que puedan ser representadas en los laboratorios. Para ello se aplicará un factor de escala (FEL) sobre los valores originales.

$$S_{escalada} = \frac{S_{teórica}}{FEL} \quad (2-10)$$

Dicho FEL no solo afectará a las cargas, sino que también afectará a los valores de impedancia de las líneas, ya que la caída de tensión de la red original debe ser igual a la caída de tensión de la red escalada.

$$\begin{aligned} \Delta V_{teórica} &= \Delta V_{escalada} \\ Z_{teórica} \cdot I_{teórica} &= Z_{escalada} \cdot I_{escalada} \\ Z_{teórica} \cdot \frac{S_{teórica}}{V_{teórica}} &= Z_{escalada} \cdot \frac{S_{escalada}}{V_{escalada}} \end{aligned} \quad (2-11)$$

Atendiendo a las ecuaciones (2-10) y (2-11) se puede afirmar que

$$Z_{escalada} = Z_{teórica} \cdot FEL \quad (2-12)$$

Al mismo tiempo, las cargas demasiado pequeñas también pueden suponer un problema a la hora de ser representadas. Esto se debe a que al ruido que pueda existir en las lecturas de corrientes pueda dificultar el control de la corriente consumida por la carga. Por ello, las cargas más pequeñas deberán demandar una potencia de al menos 5 A.

2.2.2.3 Valores comerciales de los elementos que componen la red

Como ya se ha indicado en la expresión (2-12), el escalado afectará a los valores de impedancias de manera directa. Es importante asegurarse de que los valores escalados de impedancias puedan ser representados con valores comerciales de resistencias e inductancias y que, además, estén dimensionadas para unos niveles de corrientes específicos.

A priori, los valores de inductancias son fabricadas según las características que se indiquen al fabricante. Por otro lado, las resistencias pueden asociarse en paralelo para obtener el valor óhmico aproximado al deseado o para poder disipar una cantidad de potencia concreta. Por todo esto, no se consideran un factor limitante a la hora de escalar la red.

2.2.2.4 Elección del factor de escala

Una vez realizado el reparto de cargas en la red comercial (Figura 2-5), se observa que reduciendo sus valores a la mitad estarán dentro de los niveles de potencias que pueden ser representados con los OLEs. No obstante, se decide aplicar un FEL más grande.

Utilizando un FEL igual a 3, las cargas tendrían los siguientes valores:

Tabla 2–7. Cargas originales y escaladas en la red comercial.

Nudo	Carga original (kVA)	Carga escalada (kVA)
10	8	2,67
11	16	5,33
12	32	10,67
13	30	10
14	38	12,67

Como se puede apreciar, las cargas más reducidas se encuentran en los nudos 10 y 11, y sus valores son de 2,67 kVA y 5,33 kVA respectivamente. Para comprobar si estas cargas pueden ser emuladas por los convertidores, es necesario comprobar si las corrientes demandas por dichas cargas alcanzan el valor mínimo de corriente.

$$I_{10} = \frac{S_{10}}{\sqrt{3} \cdot U} = \frac{\frac{8.000}{3}}{\sqrt{3} \cdot 400} = 3,849 \text{ A}$$

$$I_{11} = \frac{S_{11}}{\sqrt{3} \cdot U} = \frac{\frac{16.000}{3}}{\sqrt{3} \cdot 400} = 7,698 \text{ A}$$

Debido a que la corriente consumida por la carga del nudo 10 es inferior a 5 A, se decide mantener un valor de carga escalado de 8 kVA. De esta forma, la red que se estaría simulando en los laboratorios tendría una carga en el nudo 10 de 24 kVA.

Tabla 2-8. Cargas originales y escaladas por la red que se simulará en los laboratorios.

Nudo	Carga original (kVA)	Carga escalada (kVA)
10	24	8
11	16	5,33
12	32	10,67
13	30	10
14	38	12,67

Tras comprobar que los valores de potencia consumida por las cargas son asumibles por los convertidores disponibles y que existen valores comerciales de resistencias y bobinas para poder representar la caída de tensión por las líneas, se decide mantener el valor del FEL igual a 3. De esta forma, la red comercial con los nuevos valores de cargas se muestra en la siguiente figura:

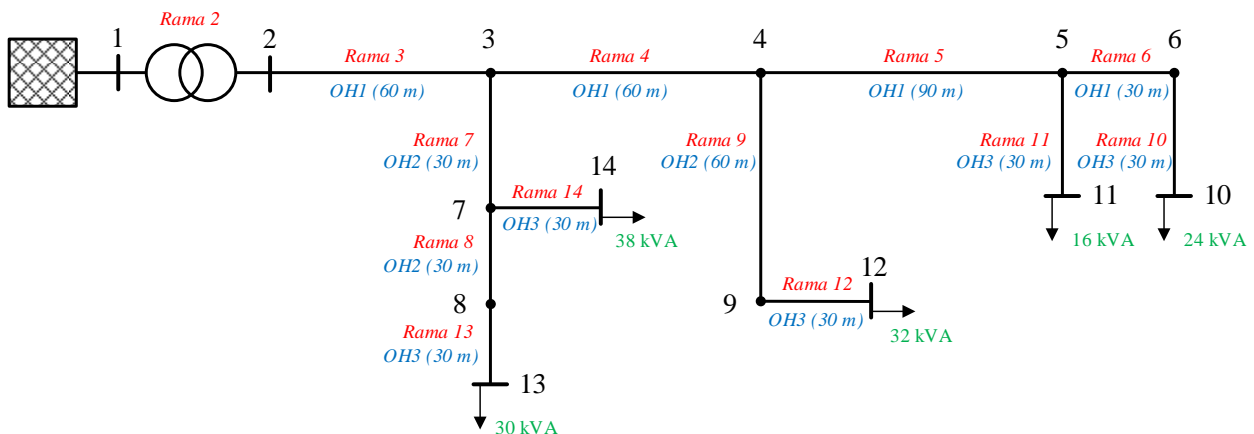


Figura 2-6. Red comercial con redistribución de cargas.

2.3 Características reales del feeder

Para poder reproducir en el laboratorio una red que simule una longitud de línea y una disposición de conductores similar a las de la red propuesta por la CIGRE (Figura 2-7), es necesario ajustarse a los parámetros resistivos e inductivos. No obstante, es demasiado complejo encontrar valores comerciales de dichos elementos que se acerquen a las magnitudes teóricas para reproducir fielmente las características del feeder. Por este motivo, una vez adquiridas las resistencias y bobinas que se instalarán en la red, se han medido sus valores resistivos e inductivos reales para poder conocer las propiedades de esta.

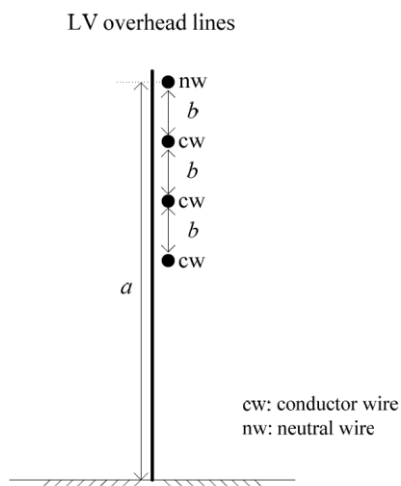


Figura 2-7. Disposición de conductores aéreos sobre poste.

2.3.1 Longitudes de líneas

La resistividad de un conductor depende del tipo de material, su sección y longitud (2-13). Suponiendo que la sección de cada tipo de conductor (OH1, OH2 y OH3) permanece constante para cada uno de los tramos a los que correspondan y que el material empleado en todos ellos es aluminio [4], la resistencia total de los elementos que se instalen en la red estará directamente relacionada con la longitud del tramo que se está representando.

$$R = \rho \cdot \frac{l}{S} \quad (2-13)$$

En el Capítulo 3 del presente trabajo se indicará que la representación de las líneas en el laboratorio se hará con resistencias, bobinas e inyecciones de corrientes que representen los acoplamientos entre conductores. Provisionalmente, para caracterizar las líneas, se van a representar con un modelo simplificado de impedancias con resistencias y bobinas sin considerar los acoplamientos entre fases (2-7).

Para conocer qué valores comerciales resistivos son necesarios adquirir, es importante tener en cuenta la resistencia de las bobinas que se instalarán en cada tramo de línea, de manera que la longitud final de cada rama sea lo más parecida posible a la que propone la CIGRE.

En la Tabla 2-9 se muestran los valores de impedancia teóricos escalados para cada una de las ramas:

Tabla 2-9. Valores teóricos de impedancia escalada para cada una de las ramas de la red comercial.

Rama	Tipo de conductor	$Z_p - Z_m (\Omega)$
3	OH1	0,0885 + 0,0556j
4	OH1	0,0885 + 0,0556j
5	OH1	0,1326 + 0,0835j
6	OH1	0,0441 + 0,0278j
7	OH2	0,1188 + 0,0310j
8	OH2	0,1188 + 0,0310j
9	OH2	0,2376 + 0,0619j
10	OH3	0,1815 + 0,0321j
11	OH3	0,1815 + 0,0321j
12	OH3	0,1815 + 0,0321j
13	OH3	0,1815 + 0,0321j
14	OH3	0,1815 + 0,0321j

A partir de los valores de las corrientes obtenidas tras realizar un flujo de cargas considerando sus valores escalados (Tabla 2-8) y las impedancias escaladas (Tabla 2-9), se han adquirido las inductancias necesarias para cada tramo de línea. Conociendo el valor de la resistencia interna de las bobinas, se han dimensionado las resistencias de las líneas.

En la Tabla 2-10 se muestran los valores resistivos e inductivos para cada una de las ramas. En ella se diferencian entre valores teóricos y valores comerciales facilitados por los fabricantes. A su vez, aparecen cuantificadas las magnitudes de resistencia interna de las bobinas.

Tabla 2–10. Valores teóricos y comerciales de R y L de cada rama.

Rama	R teórica escalada (Ω)	L teórica escalada (mH)	R comercial (Ω)	R inductancia comercial (Ω)	L comercial (mH)
3	0,0885	0,1706	0,060	0,0280	0,1772
4	0,0885	0,1706	0,060	0,0280	0,1772
5	0,1326	0,2560	0,080	0,0512	0,2659
6	0,0441	0,0853	0,044	0,0036	0,0886
7	0,1188	0,0953	0,120	0,0034	0,0986
8	0,1188	0,0953	0,120	0,0034	0,0986
9	0,2376	0,1907	0,230	0,0077	0,1973
10	0,1815	0,0991	0,180	0,0041	0,1024
11	0,1815	0,0991	0,180	0,0041	0,1024
12	0,1815	0,0991	0,180	0,0041	0,1024
13	0,1815	0,0991	0,180	0,0041	0,1024
14	0,1815	0,0991	0,180	0,0041	0,1024

Una vez conocida la resistencia total de cada una de las ramas de la red, se puede calcular la nueva longitud equivalente. En la Tabla 2-11 se puede observar que la longitud real que se estaría simulando no difiere en exceso de su valor original para cada tramo.

Tabla 2–11. Longitudes originales y emuladas de cada rama.

Rama	R teórica escalada (Ω)	Longitud original (m)	R comercial total (Ω)	Longitud real (m)
3	0,0885	60	0,0880	59,74
4	0,0885	60	0,0880	59,74
5	0,1326	90	0,1312	89,07
6	0,0441	30	0,0476	32,32
7	0,1188	30	0,1234	31,16
8	0,1188	30	0,1234	31,16
9	0,2376	60	0,2377	60,03
10	0,1815	30	0,1841	30,44
11	0,1815	30	0,1841	30,44
12	0,1815	30	0,1841	30,44
13	0,1815	30	0,1841	30,44
14	0,1815	30	0,1841	30,44

2.3.2 Distancia entre conductores

Como se puede observar en la Tabla 2-10, los valores de inductancia teóricos escalados no coinciden exactamente con los valores comerciales. Al igual que ocurre con las resistencias, esto tendrá un efecto en las características de la red que se está representando.

Atendiendo a las ecuaciones de Carson [4], se puede obtener el valor de la impedancia mutua entre dos conductores i y j a partir de la siguiente expresión:

$$X_{ij} = 2\pi f \cdot k_1 \ln \left(\frac{D_e}{D_{ij}} \right) \quad (2-14)$$

Donde k_1 es una constante de valor $0,0002 \text{ H/km}$, D_{ij} es la distancia entre los conductores i y j , y D_e se corresponde con la distancia equivalente entre conductores aéreos y su retorno ficticio por el conductor de tierra, calculada como:

$$D_e = k_2 \sqrt{\frac{\rho_g}{f}} \quad (2-15)$$

Donde, a su vez, la constante $k_2 = 658,9 \left(\frac{\text{m}}{\text{H}} \right)^{1/2}$ y $\rho_g = 100 \text{ } \Omega\text{m}$.

Los valores teóricos de reactancias para cada uno de los conductores han sido calculados a partir de la reactancia propia del conductor (X_p) y de la reactancia mutua (X_m) (2-7). En este caso, la reactancia de la bobina comercial indicada por el fabricante ($X_{comercial}$) es igual a la diferencia entre una nueva reactancia propia del conductor (X'_p) y una reactancia mutua equivalente nueva (X'_m).

$$X_{comercial} = X'_p - X'_m \quad (2-16)$$

Dado que la reactancia propia de un conductor depende del radio geométrico medio (GMR) del mismo, y para el caso de la red no se ha variado las características del conductor, se puede asumir que:

$$X_p = X_{ii} = 2\pi f \cdot k_1 \ln \left(\frac{D_e}{GMR_i} \right) = X'_p \quad (2-17)$$

Por lo tanto, conocidos los valores de reactancias $X_{comercial}$, se pueden calcular las nuevas distancias entre conductores a partir de las ecuaciones (2-2) y (2-14). Esta separación se corresponde con la distancia b que aparece reflejada en la Figura 2-6. En la siguiente tabla se muestra la separación entre conductores de la red teórica y de la red comercial que se está modelando:

Tabla 2–12. Separación de conductores originales y emuladas de cada rama.

Rama	L teórica escalada (mH)	Distancia original (m)	L comercial (mH)	Distancia real (m)
3	0,1706	0,2997	0,1772	0,3600
4	0,1706	0,2997	0,1772	0,3600
5	0,2560	0,3003	0,2659	0,3607
6	0,0853	0,2997	0,0886	0,3600
7	0,0953	0,2993	0,0986	0,3595
8	0,0953	0,2993	0,0986	0,3595
9	0,1907	0,3001	0,1973	0,3605
10	0,0991	0,3005	0,1024	0,3610
11	0,0991	0,3005	0,1024	0,3610
12	0,0991	0,3005	0,1024	0,3610
13	0,0991	0,3005	0,1024	0,3610
14	0,0991	0,3005	0,1024	0,3610

Como se puede observar, las distancias obtenidas para los valores de inductancias comerciales son muy parecidas a las distancias teóricas. Por lo tanto, se estaría modelando una red con una separación realista para una topología de red aérea.

2.4 Modelado del transformador trifásico

El modelado del transformador puede ser diferente según se esté estudiando una red de MT o de BT. Para el primer caso, dado que no suelen haber grandes desequilibrios en redes de transporte, el transformador puede ser modelado a partir de un circuito monofásico equivalente. En cambio, para el caso de las redes de distribución en las que sí existen desequilibrios, será necesario obtener un circuito trifásico equivalente del transformador.

Para ello, se puede considerar que el transformador está constituido por tres transformadores monofásicos de las mismas características (Figura 2-8).

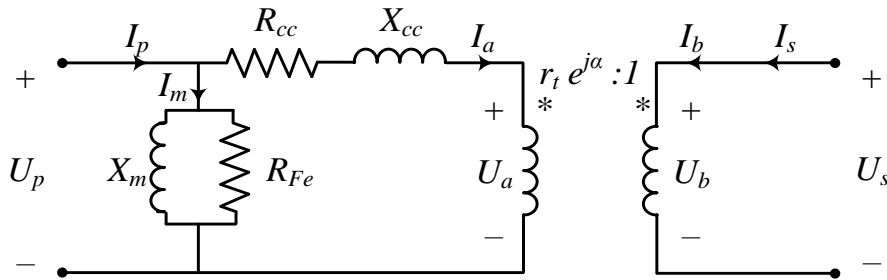


Figura 2-8. Circuito equivalente de un transformador monofásico.

El parámetro r_t estaría representando la relación de transformación (N_1/N_2) y α el desfase horario del transformador trifásico. Al tratarse de un transformador monofásico, $\alpha = 0$.

Considerando las ecuaciones del transformador ideal se obtiene:

$$\begin{aligned} U_a &= r_t e^{j\alpha} \cdot U_b \\ I_s &= -I_a \cdot r_t e^{j\alpha} \end{aligned} \quad (2-18)$$

Del mismo modo, aplicando las Leyes de Kirchhoff en el primario del transformador:

$$\begin{aligned} U_p &= Z_{cc} \cdot I_a + U_a \\ I_p &= I_a + I_m \end{aligned} \quad (2-19)$$

Si se operan estas expresiones, se puede obtener la matriz de admitancias primitiva monofásica (Y_p):

$$Y_p = \begin{bmatrix} Y_{cc} + Y_m & -Y_{cc} \cdot r_t e^{j\alpha} \\ -Y_{cc} \cdot r_t e^{j\alpha} & Y_{cc} \cdot r_t^2 \end{bmatrix} \quad (2-20)$$

Donde Y_{cc} se corresponde con la admitancia de cortocircuito y Y_m con la admitancia de la rama de magnetización.

No obstante, el modelo anterior puede ser simplificado si se desprecia la rama de magnetización y se considera solo la admitancia serie. De esta manera, pasando los valores a p.u., la matriz (2-20) puede ser escrita de la siguiente forma:

$$Y_p = \begin{bmatrix} Y_{cc} & -r_t Y_{cc} \\ -r_t Y_{cc} & r_t^2 Y_{cc} \end{bmatrix} \quad (2-21)$$

La matriz Y_p relacionará las corrientes con las tensiones del transformador:

$$\begin{bmatrix} I_p \\ I_s \end{bmatrix} = [Y_p] \begin{bmatrix} U_p \\ U_s \end{bmatrix} \quad (2-22)$$

Para el caso del transformador trifásico, la matriz de nudos primitiva Y_p quedaría de la siguiente forma:

$$Y_p = \begin{bmatrix} Y_{cc} & -r_t Y_{cc} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -r_t Y_{cc} & r_t^2 Y_{cc} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & Y_{cc} & -r_t Y_{cc} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -r_t Y_{cc} & r_t^2 Y_{cc} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & Y_{cc} & -r_t Y_{cc} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -r_t Y_{cc} & r_t^2 Y_{cc} \end{bmatrix} \quad (2-23)$$

2.4.1 Características reales del transformador

Como se puede observar, es necesario conocer las admitancias de la rama serie y de la rama de magnetización del transformador que se desea modelar. Las características del transformador que utilizará para la red del laboratorio son las siguientes.

Tabla 2–13. Características del transformador que se utilizará en el feeder comercial.

Grupo de conexión	V1 (V)	V2 (V)	S (kVA)
3-ph Dyn11	400	400	125

El fabricante facilita los siguientes datos de los ensayos de cortocircuito y vacío realizados al transformador:

Tabla 2–14. Resultados del ensayo de cortocircuito.

Ensayo de cortocircuito					
Tensión de cortocircuito (V)	Corriente de cortocircuito (A)			Potencia (W)	Lado de alimentación
	a	b	c		
9,13	187	187	189	1750	Alta tensión

Tabla 2–15. Resultados del ensayo de vacío.

Ensayo de vacío					
Tensión de vacío (V)	Corriente de vacío (A)			Potencia (W)	Lado de alimentación
	a	b	c		
400	2,8	2,8	2,8	640	Baja tensión

A partir de los datos aportados se obtienen los siguientes parámetros del circuito equivalente estrella-estrella (Y-y) del transformador:

Tabla 2–16. Parámetros del circuito equivalente del transformador.

R_{cc} (Ω)	X_{cc} (Ω)	R_{Fe} (Ω)	X_{μ} (Ω)
0,01668144	0,02272242	250,62	87,37

Para obtener el valor de la Y_{cc} del transformador que se está estudiando, se deberá tener en cuenta el grupo de conexión del mismo. Dado que el primario se encuentra conectado en triángulo (D), es necesario multiplicar por tres el valor de la impedancia de cortocircuito (Z_{cc}) obtenida a partir de los datos aportados por el fabricante. De esta forma Y_{cc} se calcularía como la inversa de la Z_{cc} en triángulo.

$$Y_{cc} = \frac{1}{Z_{cc-D}} = \frac{1}{3 \cdot Z_{cc-Y}} \quad (2-24)$$

2.4.2 Matriz de admitancias del transformador

Conocido el grupo de conexión del transformador que se quiere modelar, se puede realizar el equivalente trifásico a partir de los tres circuitos monofásicos equivalentes:

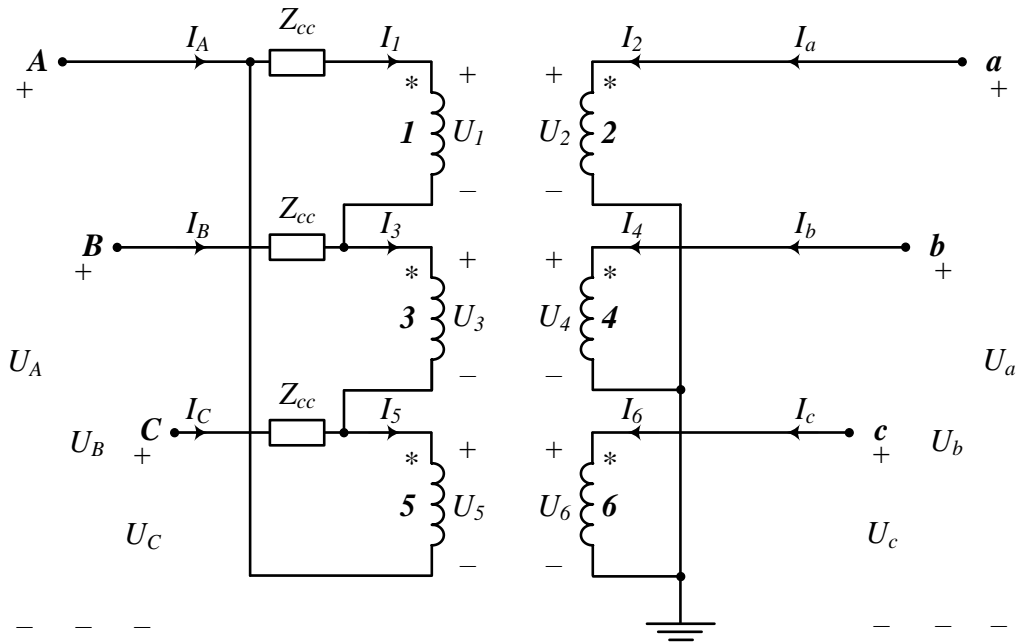


Figura 2-9. Circuito equivalente de un transformador trifásico Dyg.

Tanto las tensiones como las corrientes primarias y secundarias pueden relacionarse con sus respectivas tensiones y corrientes de cada devanado del transformador a través de una matriz de conexión N .

$$\begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ U_3 \\ U_4 \\ U_5 \\ U_6 \end{bmatrix} = N \cdot \begin{bmatrix} U_A \\ U_B \\ U_C \\ U_a \\ U_b \\ U_c \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} I_A \\ I_B \\ I_C \\ I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} = N^T \cdot \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \\ I_4 \\ I_5 \\ I_6 \end{bmatrix} \quad (2-25)$$

Del modelo Dyg se obtienen los siguientes sistemas de ecuaciones:

$$\begin{aligned} U_1 &= U_A - U_B & I_A &= I_1 - I_5 \\ U_3 &= U_B - U_C & I_B &= I_3 - I_1 \\ U_5 &= U_C - U_A & I_C &= I_5 - I_3 \\ U_2 &= U_a & I_a &= I_2 \\ U_4 &= U_b & I_b &= I_4 \\ U_6 &= U_c & I_c &= I_6 \end{aligned} \quad (2-26)$$

De donde se deduce que:

$$\begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ U_3 \\ U_4 \\ U_5 \\ U_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_A \\ U_B \\ U_C \\ U_a \\ U_b \\ U_c \end{bmatrix} \quad (2-27)$$

$$\begin{bmatrix} I_A \\ I_B \\ I_C \\ I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ -1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \\ I_4 \\ I_5 \\ I_6 \end{bmatrix} \quad (2-28)$$

Por lo tanto, la matriz de conexiones N sería la siguiente:

$$N = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2-29)$$

Operando las expresiones (2-22) y (2-25) se pueden relacionar las tensiones y corrientes del primario y del secundario del transformador:

$$\begin{bmatrix} I_A \\ I_B \\ I_C \\ I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} = N^T \cdot Y_P \cdot N \cdot \begin{bmatrix} U_A \\ U_B \\ U_C \\ U_a \\ U_b \\ U_c \end{bmatrix} \quad (2-30)$$

Del producto de las matrices de conexión y la matriz primitiva del transformador trifásico, se puede obtener la matriz de admitancias Y_{bus} .

$$Y_{bus} = N^T \cdot Y_p \cdot N \quad (2-31)$$

Operando la expresión (2-31) se obtiene:

$$Y_{bus} = \begin{bmatrix} 2Y_{cc} & -Y_{cc} & -Y_{cc} & -r_t Y_{cc} & 0 & r_t Y_{cc} \\ -Y_{cc} & 2Y_{cc} & -Y_{cc} & r_t Y_{cc} & -r_t Y_{cc} & 0 \\ -Y_{cc} & -Y_{cc} & 2Y_{cc} & 0 & r_t Y_{cc} & -r_t Y_{cc} \\ -r_t Y_{cc} & r_t Y_{cc} & 0 & r_t^2 Y_{cc} & 0 & 0 \\ 0 & -r_t Y_{cc} & r_t Y_{cc} & 0 & r_t^2 Y_{cc} & 0 \\ r_t Y_{cc} & 0 & -r_t Y_{cc} & 0 & 0 & r_t^2 Y_{cc} \end{bmatrix} \quad (2-32)$$

La matriz Y_{bus} se puede dividir en cuatro submatrices cuadradas de tres filas y tres columnas que relacionarán las corrientes y tensiones del primario y secundario.

$$Y_{bus} = \begin{bmatrix} Y_{pp} & Y_{ps} \\ Y_{sp} & Y_{ss} \end{bmatrix} \quad (2-33)$$

No obstante, en la matriz (2-32) no se estaría considerando la rama de magnetización. Dado que el ensayo de

vacío fue realizado en el lado de baja tensión del transformador, los parámetros de dicha rama se encuentran referidos al secundario, por lo que pueden ser sumados directamente en la submatriz Y_{ss} , obteniéndose finalmente la siguiente matriz de admitancias:

$$Y_{bus} = \begin{bmatrix} 2Y_{cc} & -Y_{cc} & -Y_{cc} & -r_t Y_{cc} & 0 & r_t Y_{cc} \\ -Y_{cc} & 2Y_{cc} & -Y_{cc} & r_t Y_{cc} & -r_t Y_{cc} & 0 \\ -Y_{cc} & -Y_{cc} & 2Y_{cc} & 0 & r_t Y_{cc} & -r_t Y_{cc} \\ -r_t Y_{cc} & r_t Y_{cc} & 0 & r_t^2 Y_{cc} + Y_m & 0 & 0 \\ 0 & -r_t Y_{cc} & r_t Y_{cc} & 0 & r_t^2 Y_{cc} + Y_m & 0 \\ r_t Y_{cc} & 0 & -r_t Y_{cc} & 0 & 0 & r_t^2 Y_{cc} + Y_m \end{bmatrix} \quad (2-34)$$

2.5 Comparación de redes

Para concluir con la caracterización de la red modelada, se va a realizar una comparación entre la red comercial teórica (Figura 2-3) y la red que se instalará en los laboratorios (Figura 2-6). Para ello se realizará un flujo de cargas para dos escenarios de repartos de cargas (Tabla 2-17).

Tabla 2-17. Escenarios de repartos de cargas entre fases para la comparación de las redes teórica y modelada.

Escenario	Fase A	Fase B	Fase C
Equilibrado	33,33%	33,33%	33,33%
Desequilibrado	50%	30%	20%

En ambos casos se utilizará un modelo completo de impedancias que simulen el acoplamiento entre fases. Dado que para la red teórica se utilizarán las matrices de impedancias recogidas en la Tabla 2-2, para la red modelada será necesario obtener los valores de impedancia propia y de acoplamiento, considerando para ello las nuevas longitudes y distancias entre fases calculados anteriormente (Tablas 2-11 y 2-12). Puesto que los elementos diagonales de las matrices solo dependen de las características del conductor, sus valores no se verán modificados. A partir de las ecuaciones de Carson [4], se obtienen las nuevas matrices de los conductores OH1, OH2 y OH3:

Tabla 2-18. Matrices de impedancias de la red comercial caracterizada.

Tipo conductor		Matriz de impedancias (Ω/km)			
		A	B	C	N
OH1	A	0,540 + 0,777j	0,049 + 0,494j	0,049 + 0,450j	0,049 + 0,425j
	B	0,049 + 0,494j	0,540 + 0,777j	0,049 + 0,494j	0,049 + 0,450j
	C	0,049 + 0,450j	0,049 + 0,494j	0,540 + 0,777j	0,049 + 0,494j
	N	0,049 + 0,425j	0,049 + 0,450j	0,049 + 0,494j	0,540 + 0,777j
OH2	A	1,369 + 0,812j	0,049 + 0,494j	0,049 + 0,450j	0,049 + 0,425j
	B	0,049 + 0,494j	1,369 + 0,812j	0,049 + 0,494j	0,049 + 0,450j
	C	0,049 + 0,450j	0,049 + 0,494j	1,369 + 0,812j	0,049 + 0,494j
	N	0,049 + 0,425j	0,049 + 0,450j	0,049 + 0,494j	1,369 + 0,812j
OH3	A	2,065 + 0,825j	0,049 + 0,494j	0,049 + 0,450j	0,049 + 0,425j
	B	0,049 + 0,494j	2,065 + 0,825j	0,049 + 0,494j	0,049 + 0,450j
	C	0,049 + 0,450j	0,049 + 0,494j	2,065 + 0,825j	0,049 + 0,494j
	N	0,049 + 0,425j	0,049 + 0,450j	0,049 + 0,494j	2,065 + 0,825j

Es importante señalar que el número de cargas y sus magnitudes serán distintos en ambos casos. Del mismo modo, también lo serán sus nudos. Para realizar la comparación entre ambas redes, se tomará como referencia la numeración de los nudos de la Figura 2-6. En el caso de la red teórica se mostrará la tensión de sus nudos equivalentes.

- Escenario equilibrado

En la Figura 2-10 se muestra la evolución de la caída de tensión cuando existe un reparto de cargas equitativo para cada fase. A pesar de ello, en ambos casos se aprecia que la tensión A-N es la que sufre una caída mayor respecto de las fases B y C. Esto es debido al efecto del acoplamiento entre fases, los cuales se estudiarán en el siguiente capítulo.

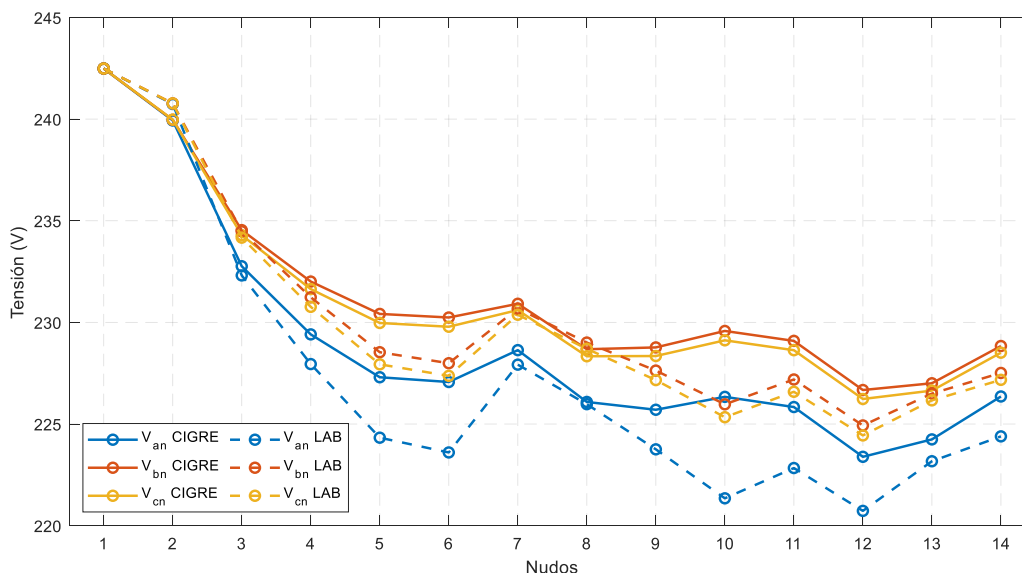


Figura 2-10. Comparación de la caída de tensión en la red teórica y modelada para cargas equilibradas.

Teniendo en cuenta las diferencias respecto de las magnitudes de las cargas y la topología de ambas redes, se aprecia que la tendencia en la evolución de las tensiones en ambos casos es similar. No obstante, observando los niveles de tensiones en ambas redes, se puede deducir que la red modelada estaría representando una red de distribución con mayor caída de tensión.

Por lo tanto, se podría concluir que se trata de una red de distribución de tipo comercial diferente, pero que emula un comportamiento realista. No obstante, se va a estudiar la evolución de la tensión en ambas redes cuando los repartos de carga entre fases son más desproporcionados.

- Escenario desequilibrado

La variación de las tensiones de fases de cada red ante un escenario desequilibrado está representada en la Figura 2-11. Dado que las fases B y C son las menos cargadas, la caída de tensión no será muy pronunciada. A pesar de que en el caso equilibrado ya se observó que la red modelada estaría representando una red comercial con mayor caída de tensión, los niveles de los voltajes de las fases más descargadas tienen una evolución similar.

Dicho efecto, queda evidenciado en la evolución de la tensión de fase de la fase A, donde se puede apreciar de nuevo que la red con mayor caída de tensión vuelve a ser la caracterizada en los apartados anteriores.

En este punto, no cabe comparar la magnitud de las variaciones de tensiones de cada red debido a las diferencias que existen entre ellas. Lo más relevante de los resultados de los flujos de cargas es que se observa que la red que se ha modelado para ser montada en los laboratorios sigue la tendencia de la red de distribución tomada como referencia. De esta forma, queda caracterizada por completo la nueva red comercial.

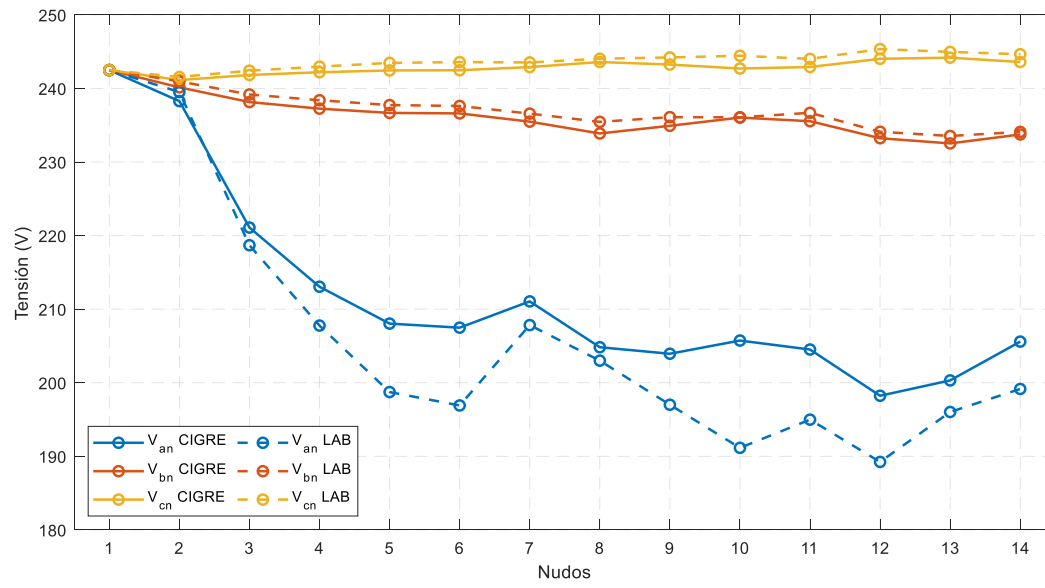


Figura 2-11. Comparación de la caída de tensión en la red teórica y modelada para cargas desequilibradas.

3 ACOPLAMIENTO MAGNÉTICO

La circulación de la corriente eléctrica por un conductor provocará que se induzca un campo magnético cuya intensidad estará relacionada con la magnitud de la corriente. En el caso de las redes eléctricas, ya sean aéreas o subterráneas, debido a la proximidad de los conductores, el campo magnético producido por la circulación de corriente en uno de los conductores provocará una caída de tensión adicional. Es lo que se conoce como acoplamiento magnético. El valor de dicha caída de tensión dependerá de la distancia entre conductores y de la intensidad que circule por el conductor que provoque dicho efecto [7].

Al igual que se hizo con la red residencial de BT [5], en la subred comercial que se instalará en los laboratorios se deberá simular la caída de tensión debido al acoplamiento entre fases.

3.1 Efecto del acoplamiento magnético

Los elementos no diagonales de la matriz original de impedancias de los conductores (2-1) representarían el acoplamiento entre fases. No obstante, en el Capítulo 2 del presente trabajo se realizó una simplificación al considerar todas las impedancias de acoplamiento iguales a una impedancia mutua, Z_m . Para poder representar dichos acoplamientos, en el sistema de ecuaciones (2-5) se deberá sumar una caída de tensión que permita obtener una matriz similar a la matriz original de impedancias.

$$\begin{bmatrix} U_{ia} \\ U_{ib} \\ U_{ic} \\ U_{in} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_p - Z_m & 0 & 0 & 0 \\ 0 & Z_p - Z_m & 0 & 0 \\ 0 & 0 & Z_p - Z_m & 0 \\ 0 & 0 & 0 & Z_p - Z_m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \\ I_n \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} U_{ja} \\ U_{jb} \\ U_{jc} \\ U_{jn} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} Z_m & Z_{ab} & Z_{ac} & Z_{an} \\ Z_{ba} & Z_m & Z_{bc} & Z_{bn} \\ Z_{ca} & Z_{cb} & Z_m & Z_{cn} \\ Z_{na} & Z_{nb} & Z_{nc} & Z_m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \\ I_n \end{bmatrix} \quad (3-1)$$

De esta forma, además de la impedancia de línea ($Z_p - Z_m$), habría una caída de tensión en cada una de las fases debida al acoplamiento magnético. Dicha caída de tensión podría representarse a partir de fuentes de tensión dependientes de intensidad (FTDI) cuyo valor variará en función de la magnitud de corriente que circule por cada una de las fases:

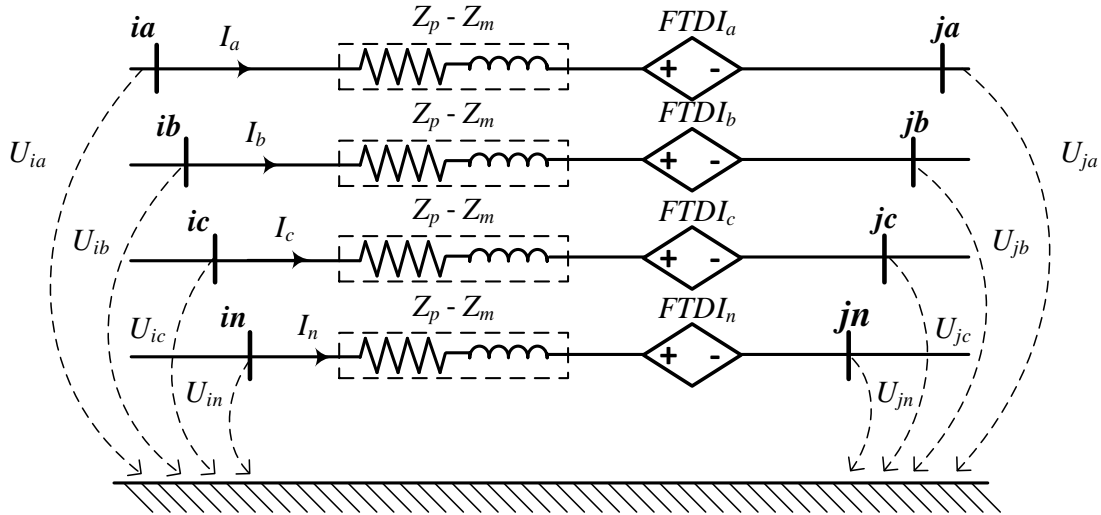


Figura 3-1. Simulación del acoplamiento magnético entre fases de la rama $i-j$ mediante FTDIs.

No obstante, para que este efecto pueda ser emulado en los laboratorios por convertidores similares a los que se utilizarán para las cargas, se puede obtener un circuito equivalente en el que en lugar de contar con FTDIs se contarían con fuentes de intensidad dependientes de intensidad (FIDI), las cuales se representarían en paralelo con la impedancia de la línea. De esta manera, el valor de la FIDI para cada una de las fases se obtendría de la siguiente forma:

$$\begin{aligned}
 FIDI_a &= \frac{Z_m I_a + Z_{ab} I_b + Z_{ac} I_c + Z_{an} I_n}{Z_p - Z_m} \\
 FIDI_b &= \frac{Z_{ba} I_a + Z_m I_b + Z_{bc} I_c + Z_{bn} I_n}{Z_p - Z_m} \\
 FIDI_c &= \frac{Z_{ca} I_a + Z_{cb} I_b + Z_m I_c + Z_{cn} I_n}{Z_p - Z_m} \\
 FIDI_n &= \frac{Z_{na} I_a + Z_{nb} I_b + Z_{nc} I_c + Z_m I_n}{Z_p - Z_m}
 \end{aligned} \tag{3-2}$$

Aplicando conceptos de teoría de circuitos, las FIDIs que se encuentran en paralelo con las impedancias de línea de cada una de las fases, podrán desplazarse y obtener un circuito equivalente [8]. Realizando la traslación de las fuentes de corriente, el acoplamiento entre conductores se podría representar de la siguiente forma:

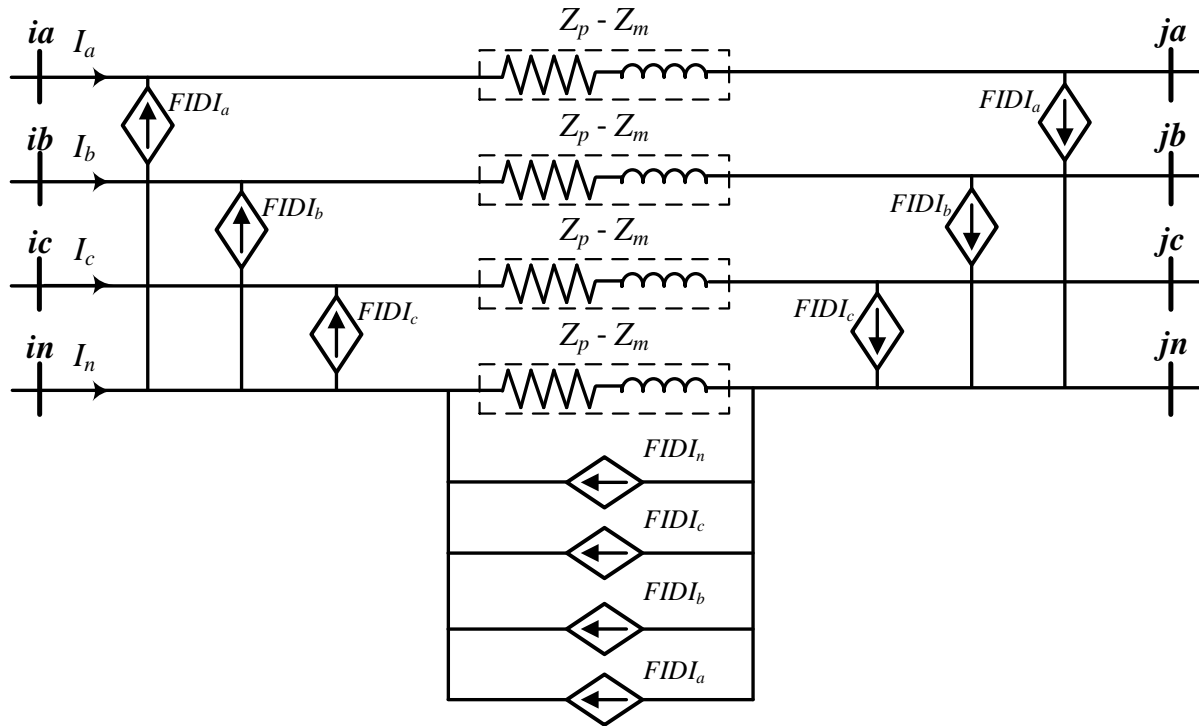


Figura 3-2. Simulación del acoplamiento magnético entre fases de la rama i - j mediante FIDIs.

3.2 Adaptación del acoplamiento en la red

Atendiendo al esquema de la Figura 3-2, se podría obtener una FIDI equivalente a las fuentes que se encuentran en paralelo con la impedancia del neutro.

$$FIDI_{eq} = FIDI_a + FIDI_b + FIDI_c + FIDLn \quad (3-3)$$

Sacando factor común el valor de las corrientes por las líneas y reordenado:

$$FIDI_{eq} = I_a k_1 + I_b k_2 + I_c k_3 + I_n k_4 \quad (3-4)$$

Donde:

$$\begin{aligned} k_1 &= \left(\frac{Z_m + Z_{ab} + Z_{ac} + Z_{an}}{Z_p - Z_m} \right) \\ k_2 &= \left(\frac{Z_{ba} + Z_m + Z_{bc} + Z_{bn}}{Z_p - Z_m} \right) \\ k_3 &= \left(\frac{Z_{ca} + Z_{cb} + Z_m + Z_{cn}}{Z_p - Z_m} \right) \\ k_4 &= \left(\frac{Z_{na} + Z_{nb} + Z_{nc} + Z_m}{Z_p - Z_m} \right) \end{aligned} \quad (3-5)$$

En la Tabla 3-1 se muestran los valores de k_1 , k_2 , k_3 y k_4 para conductores subterráneos y aéreos. Se puede comprobar que para la red residencial dichos factores tienen el mismo valor, mientras que para la red comercial esta particularidad no se cumple.

Tabla 3-1. Factores k_1 , k_2 , k_3 y k_4 para conductores subterráneos (UG) y aéreos (OH).

Red	Tipo de conductor	k_1	k_2	k_3	k_4
Residencial	UG1	7,557 + 12,642j	7,557 + 12,642j	7,557 + 12,642j	7,557 + 12,642j
	UG3	0,592 + 3,402j	0,592 + 3,402j	0,592 + 3,402j	0,592 + 3,402j
Comercial	OH1	1,992 + 2,625j	2,054 + 2,728j	2,054 + 2,728j	1,992 + 2,625j
	OH2	0,478 + 1,305j	0,490 + 1,355j	0,490 + 1,355j	0,478 + 1,305j
	OH3	0,250 + 0,891j	0,256 + 0,924j	0,256 + 0,924j	0,250 + 0,891j

En una red subterránea, la distancia a la que se encuentran los conductores es muy parecida en todos los casos. Como ya se estudió en el capítulo anterior, las impedancias de acoplamiento están relacionadas con dicha distancia, por lo que los elementos no diagonales de la matriz de impedancias (2-1) serán muy parecidos.

Considerando que en todo momento la suma de las corrientes por los conductores debe ser nula, las FIDIs en paralelo con la impedancia de línea del conductor neutro se podrían anular (Figura 3-3).

$$k_1 = k_2 = k_3 = k_4 = k$$

$$FIDI_{eq} = (I_a + I_b + I_c + I_n) \cdot k = 0 \tag{3-6}$$

Sin embargo, en una red aérea como la red que se está estudiando, la disposición de los conductores difiere de la de una red subterránea, apareciendo distancias muy diferentes según la posición del conductor en el poste (Figura 2-6). Por consiguiente, y como se puede deducir de la Tabla 3-1, la $FIDI_{eq}$ en paralelo con la impedancia del neutro no se podrá anular.

Así pues, en comparación con la red residencial que ya se encuentra instalada en los laboratorios, el número de convertidores necesarios para poder representar el efecto de los acoplamientos sería muy elevado. Todo esto conllevaría que gran parte del espacio disponible en las instalaciones de los laboratorios sería ocupado, además de que se debería realizar un desembolso económico considerable. Debido a esto, se van a estudiar algunas propuestas de simplificación que permitan poder llevar a la práctica el efecto del acoplamiento magnético en la red.

3.2.1 Primera simplificación

La topología de los convertidores que se instalarán en la red del laboratorio es de cuatro columnas, por lo que solo se podrán controlar tres de las corrientes que salen o entran del mismo. Debido a esto, si se quisieran controlar las cuatro corrientes de acoplamiento por rama, sería necesario añadir un convertidor adicional. Por este motivo, se decide realizar una simplificación y eliminar una de las FIDI, en concreto la $FIDI_{eq}$ que se encuentra en paralelo con la impedancia del neutro (Figura 3-3).

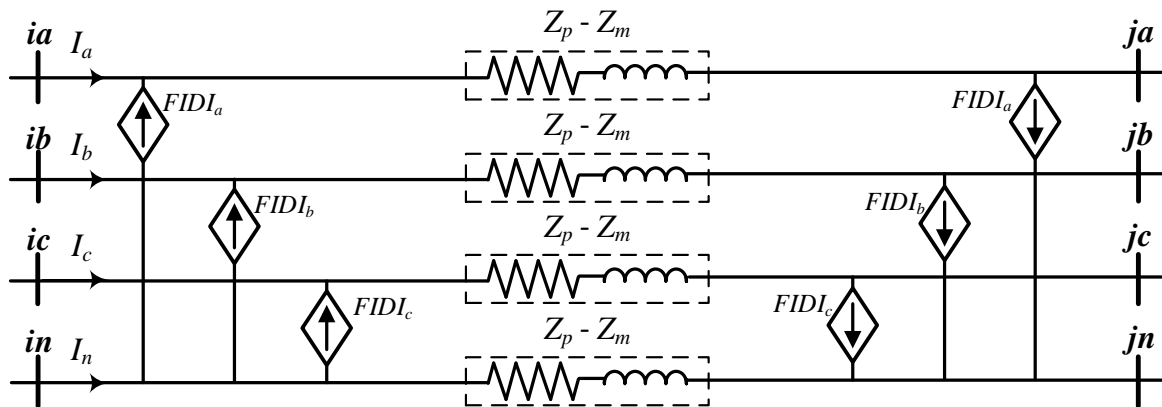


Figura 3-3. Simulación del acoplamiento magnético de las fases a, b y c.

Con el objetivo de estudiar cómo afecta esta simplificación, se va a comparar la evolución de las tensiones cuando se considera el efecto del acoplamiento magnético completo, y cuando se elimina la $FIDI_{eq}$ en paralelo con la impedancia del neutro. Para ello, se hará uso de las nuevas matrices de impedancias de los conductores OH1, OH2 y OH3 que se obtuvieron para emular un modelo completo de las líneas en el capítulo anterior (Tabla 2-17).

En los nudos con consumo, se utilizará un perfil de carga de tipo comercial (Figura 3-4). Además, se emplearán tres escenarios de reparto de cargas entre fases para estudiar la evolución de las tensiones en la red (Tabla 3-3).

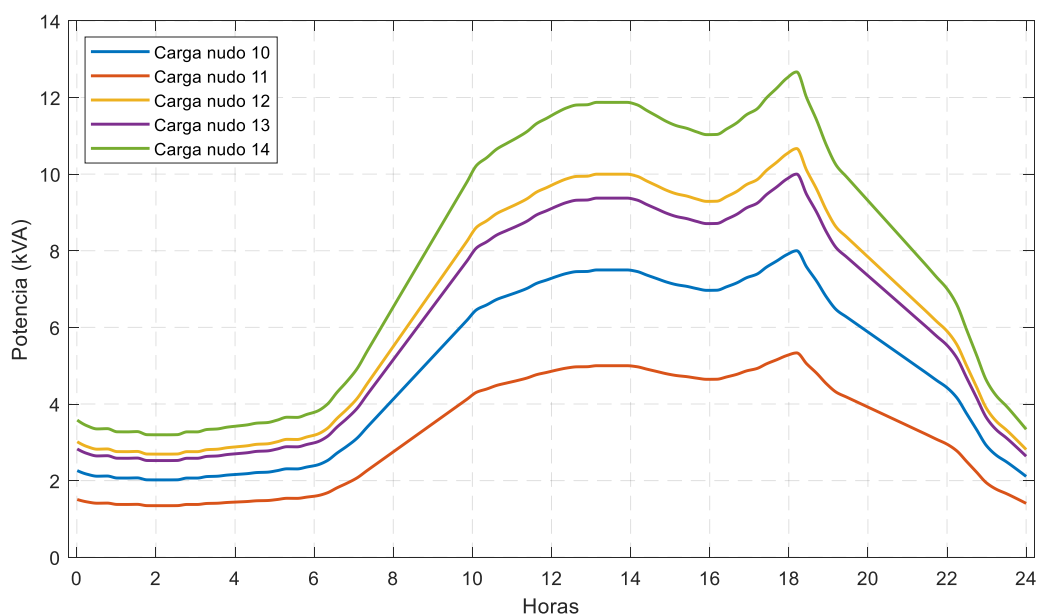


Figura 3-4. Perfiles de consumo en los nudos con carga aplicando FEL.

Tabla 3-2. Escenarios de reparto de cargas entre fases.

Escenario	Fase A	Fase B	Fase C
Equilibrado	33,33%	33,33%	33,33%
Desequilibrio medio	50%	30%	20%
Desequilibrio extremo	60%	10%	30%

- Escenario equilibrado

En la Tabla 3-4 se muestran los errores máximos absolutos de tensiones en cada uno de los nudos de la red tras haber eliminado las $FIDI_{eq}$ en todas las ramas. Se puede apreciar que el error más grande cometido es de 3,51 V, por lo que a priori la simplificación se podría asumir.

Sin embargo, para conocer cuál es la tendencia del error cometido al realizar esta simplificación, se ha calculado el error medio de las tensiones en cada nudo de la red. En la Tabla 3-5 se observa que el error promedio más grande es ligeramente superior a 2 V. Esto indicaría que, a pesar de la simplificación realizada, los resultados obtenidos no serían muy diferentes de los del caso exacto. No obstante, será necesario estudiar qué error se comete en escenarios en los que exista un mayor desequilibrio en el reparto de cargas.

Tabla 3-3. Errores máximos absolutos de tensión al despreciar el acoplamiento en el neutro ante un escenario equilibrado de reparto de cargas.

Nudo	Error máximo (V)						
	Fase A	Fase B	Fase C	Fase N	Fase A-N	Fase B-N	Fase C-N
1	0	0	0	0	0	0	0
2	0,0228	0,0227	0,0017	0	0,0228	0,0227	0,0017
3	0,1156	0,0991	0,0454	0,2887	0,5250	1,0263	0,5632
4	0,1600	0,1341	0,0739	0,4345	0,7812	1,5409	0,8595
5	0,2055	0,1429	0,1124	0,5507	1,0024	1,9462	1,1188
6	0,1688	0,1868	0,0788	0,5707	1,0004	2,0729	1,1334
7	0,0364	0,3111	0,0819	0,2153	1,5896	2,6147	0,6455
8	0,0730	0,4085	0,1375	0,6006	2,0663	3,3199	0,6870
9	0,1885	0,1970	0,1023	0,1550	1,9068	2,8799	1,0869
10	0,1433	0,2396	0,0660	0,5874	1,0205	2,2104	1,1600
11	0,1887	0,1766	0,1036	0,5618	1,0155	2,0357	1,1361
12	0,1663	0,2829	0,0888	0,2333	1,9493	3,0796	1,1232
13	0,0913	0,4952	0,1541	0,4881	2,1061	3,5102	0,7163
14	0,0595	0,4075	0,1066	0,1375	1,6301	2,8412	0,6812

Tabla 3-4. Errores promedios de tensión al despreciar el acoplamiento en el neutro ante un escenario equilibrado de reparto de cargas.

Nudo	Error medio (V)						
	Fase A	Fase B	Fase C	Fase N	Fase A-N	Fase B-N	Fase C-N
1	0	0	0	0	0	0	0
2	0,0096	0,0094	0,0008	0	0,0096	0,0094	0,0008
3	0,0526	0,0370	0,0229	0,1608	0,2937	0,5853	0,3302
4	0,0733	0,0493	0,0370	0,2421	0,4388	0,8808	0,5031
5	0,0967	0,0508	0,0575	0,3077	0,5658	1,1146	0,6547
6	0,0742	0,0734	0,0368	0,3190	0,5637	1,1885	0,6625
7	0,0254	0,1517	0,0576	0,1712	0,9236	1,5219	0,3721
8	0,0590	0,2040	0,0929	0,4159	1,2045	1,9369	0,3927
9	0,0845	0,0756	0,0487	0,0547	1,1012	1,6661	0,6314
10	0,0579	0,1008	0,0262	0,3290	0,5720	1,2649	0,6765
11	0,0860	0,0661	0,0503	0,3144	0,5712	1,1646	0,6638
12	0,0676	0,1186	0,0360	0,0855	1,1186	1,7745	0,6502
13	0,0738	0,2470	0,1065	0,3567	1,2209	2,0399	0,4083
14	0,0468	0,2006	0,0763	0,1117	0,9405	1,6465	0,3912

- Escenario con desequilibrio medio

En este caso, la mitad del consumo de las cargas estaría pasando por la fase A. En la Tabla 3-6 se aprecia que las tensiones con mayor error serían las tensiones de fase A-N y B-N, llegándose a obtener un error máximo de 2,71 V en el nudo 12 de la segunda.

A pesar del desequilibrio introducido, los errores absolutos son ligeramente inferiores a los cometidos en el escenario anterior. Lo mismo ocurre con el valor promedio de estos, llegándose a obtener una magnitud máxima de 1,62 V de error (Tabla 3-7).

Por otro lado, se aprecia que en ambos escenarios existe una tendencia creciente en los errores de tensiones en los nudos que se encuentran más alejados del origen de la red. No obstante, sigue siendo una diferencia muy reducida respecto del caso que utiliza un modelo completo para emular las líneas de la red.

Tabla 3-5. Errores máximos absolutos de tensión al despreciar el acoplamiento en el neutro ante un escenario con desequilibrio medio de cargas.

Nudo	Error máximo (V)						
	Fase A	Fase B	Fase C	Fase N	Fase A-N	Fase B-N	Fase C-N
1	0	0	0	0	0	0	0
2	0,0343	0,0155	0,0010	0	0,0343	0,0155	0,0010
3	0,1817	0,0608	0,0201	0,1817	0,3950	0,7450	0,4762
4	0,2579	0,0801	0,0321	0,2776	0,5806	1,1136	0,7107
5	0,3337	0,0811	0,0515	0,3548	0,7473	1,3901	0,8962
6	0,2644	0,1126	0,0322	0,3239	0,6522	1,4824	0,9626
7	0,0840	0,2185	0,0592	0,8120	1,0742	2,0166	0,5585
8	0,1624	0,2903	0,0940	1,0634	1,3886	2,5832	0,5861
9	0,3134	0,1174	0,0401	1,0321	1,6086	2,1601	0,6874
10	0,2136	0,1478	0,0225	0,2348	0,6102	1,5630	1,0030
11	0,3026	0,1042	0,0447	0,2969	0,7227	1,4462	0,9234
12	0,2759	0,1758	0,0266	0,9440	1,6146	2,2959	0,7174
13	0,2036	0,3506	0,1067	0,9702	1,3798	2,7130	0,6146
14	0,1364	0,2866	0,0763	0,6835	1,0378	2,1720	0,6094

Tabla 3-6. Errores promedios de tensión al despreciar el acoplamiento en el neutro ante un escenario con desequilibrio medio de cargas.

Nudo	Error medio (V)						
	Fase A	Fase B	Fase C	Fase N	Fase A-N	Fase B-N	Fase C-N
1	0	0	0	0	0	0	0
2	0,0127	0,0067	0,0002	0	0,0127	0,0067	0,0002
3	0,0743	0,0230	0,0124	0,0635	0,1736	0,4238	0,3091
4	0,1053	0,0299	0,0194	0,0966	0,2554	0,6350	0,4647
5	0,1411	0,0294	0,0306	0,1263	0,3363	0,7958	0,5890
6	0,1012	0,0454	0,0187	0,1071	0,2824	0,8521	0,6284
7	0,0636	0,1127	0,0367	0,4063	0,5770	1,1982	0,3873
8	0,1235	0,1534	0,0582	0,5374	0,7610	1,5423	0,4186
9	0,1224	0,0458	0,0235	0,5047	0,8373	1,2679	0,4951
10	0,0706	0,0651	0,0119	0,0704	0,2520	0,9023	0,6578
11	0,1218	0,0394	0,0260	0,0935	0,3174	0,8300	0,6086
12	0,0924	0,0770	0,0144	0,4366	0,8190	1,3455	0,5240
13	0,1535	0,1851	0,0669	0,4706	0,7406	1,6168	0,4459
14	0,1046	0,1493	0,0482	0,3185	0,5418	1,2887	0,4278

- Escenario con desequilibrio extremo

De nuevo, vuelve a ser el conductor de la fase A el que se encuentre más cargado en este escenario. La tensión que más difiere respecto del caso que considera todos los acoplamientos es la tensión de fase A-N, cuyo error máximo se produce en el nudo 12 y su valor es de aproximadamente 3,64 V (Tabla 3-8).

A pesar de ser el escenario en el que se produce el error absoluto mayor, los valores promedios de estos son los más reducidos.

Tabla 3–7. Errores máximos absolutos de tensión al despreciar el acoplamiento en el neutro ante un escenario con desequilibrio extremo de cargas.

Nudo	Error máximo (V)						
	Fase A	Fase B	Fase C	Fase N	Fase A-N	Fase B-N	Fase C-N
1	0	0	0	0	0	0	0
2	0,0929	0,0018	0,0122	0	0,0929	0,0018	0,0122
3	0,5109	0,0113	0,0261	1,0463	1,5176	0,7706	0,3698
4	0,8108	0,0172	0,0387	1,6639	2,4064	1,2353	0,6521
5	1,0759	0,0210	0,0351	2,1801	3,1666	1,6186	0,9212
6	1,0112	0,0245	0,0723	2,2007	3,0974	1,6688	0,9347
7	0,2271	0,0423	0,1626	1,2547	1,4009	1,0451	0,5082
8	0,1834	0,0558	0,2230	1,3356	1,3437	1,1630	0,5729
9	1,1032	0,0265	0,0585	2,2925	3,3426	1,6520	1,0878
10	1,0570	0,0350	0,1054	2,2975	3,2610	1,7344	1,0859
11	1,1015	0,0280	0,0567	2,2427	3,2637	1,6621	1,0136
12	1,2056	0,0407	0,1043	2,4680	3,6393	1,7785	1,3165
13	0,2352	0,0672	0,2598	1,3599	1,3454	1,2097	0,6528
14	0,1802	0,0566	0,2086	1,2942	1,4091	1,1107	0,6035

Tabla 3–8. Errores promedios de tensión al despreciar el acoplamiento en el neutro ante un escenario con desequilibrio extremo de cargas.

Nudo	Error medio (V)						
	Fase A	Fase B	Fase C	Fase N	Fase A-N	Fase B-N	Fase C-N
1	0	0	0	0	0	0	0
2	0,0209	0,0008	0,0040	0	0,0209	0,0008	0,0040
3	0,1302	0,0036	0,0059	0,5067	0,6082	0,3921	0,1205
4	0,2041	0,0054	0,0088	0,7837	0,9409	0,6095	0,2051
5	0,2827	0,0062	0,0110	1,0248	1,2470	0,7951	0,2875
6	0,2381	0,0086	0,0165	1,0319	1,1974	0,8170	0,2926
7	0,0579	0,0236	0,0810	0,6478	0,5390	0,5705	0,1765
8	0,1257	0,0324	0,1164	0,7041	0,5062	0,6481	0,2028
9	0,2597	0,0087	0,0122	1,0743	1,2750	0,8304	0,3260
10	0,2244	0,0143	0,0312	1,0578	1,2089	0,8445	0,3305
11	0,2738	0,0094	0,0122	1,0437	1,2549	0,8140	0,3120
12	0,2463	0,0164	0,0289	1,1106	1,2999	0,8718	0,3801
13	0,1634	0,0391	0,1369	0,7081	0,4769	0,6725	0,2275
14	0,0981	0,0319	0,1068	0,6576	0,5059	0,6039	0,2063

Dada las magnitudes de los errores que se aprecian en cada escenario de reparto de cargas, se pueden considerar asumibles. Por lo tanto, se justifica la eliminación de la $FIDI_{eq}$.

3.2.2 Segunda simplificación

Como se ha podido comprobar, la simplificación de los convertidores que emularían la $FIDI_{eq}$ no perjudica de forma significativa la caída de tensión obtenida al realizar un flujo de cargas, en comparación con una red que emula el efecto del acoplamiento magnético completo. No obstante, para reproducir el caso anterior sería necesario introducir convertidores adicionales en la red. En concreto, en los nudos en los que no existen cargas asociadas.

Con el objetivo de examinar cómo afecta reducir el número de convertidores, se procede a realizar una segunda simplificación en la que, además de eliminar la $FIDI_{eq}$, se va a considerar que solo se inyectarán

corrientes de acoplamiento en los nudos con carga y en el nudo 2.

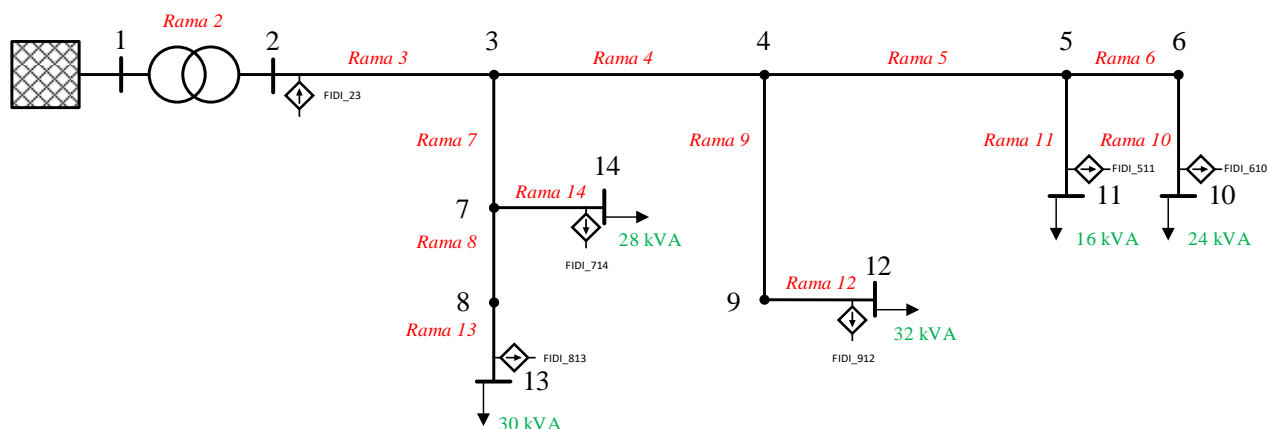


Figura 3-5. Red comercial con FIDIs en nudo 2 y nudos con carga.

Para facilitar la lectura del capítulo, los resultados de las simplificaciones propuestas se encuentran en el Anexo I del trabajo. En la siguiente tabla se resaltan los errores más relevantes de cada escenario, indicando dónde se producen:

Tabla 3-9. Errores máximos absolutos de tensión ante distintos escenarios de reparto de cargas considerando acoplamiento en los nudos con carga y nudo 2.

Escenario	Error máximo (V)	Nudo	Tensión
Equilibrado	2,3088	10	Fase A-N
Desequilibrio medio	3,7476	10	Fase B-N
Desequilibrio extremo	7,8642	10	Fase A-N

Tabla 3-10. Errores promedios máximos de tensión ante distintos escenarios de reparto de cargas considerando acoplamiento en los nudos con carga y nudo 2.

Escenario	Error medio (V)	Nudo	Tensión
Equilibrado	1,3017	10	Fase A-N
Desequilibrio medio	1,9795	10	Fase B-N
Desequilibrio extremo	2,5974	10	Fase B-N

En la tabla 4-10 se observa que la magnitud del error aumenta considerablemente respecto de la simplificación anterior. En el caso equilibrado se produce un error máximo de 2,3 V en la tensión fase A-N, mientras que en los escenarios con desequilibrios se observa que el error aumenta conforme el reparto de cargas se hace más desproporcionado, obteniéndose 7,86 V de diferencia cuando existe una descompensación extrema de carga entre fases. Por otro lado, es importante indicar que la fase con un error promedio mayor no se corresponde con la que experimenta el error máximo, produciéndose un enmascaramiento a la hora de reconocer qué fase se aleja más del resultado teórico.

Al mismo tiempo, se vuelve a apreciar que los nudos más alejados del origen de la red son los que presentan un error mayor. Esto se debe a que el error en la caída de tensión se va acumulando aguas abajo.

En esta nueva simplificación de equipos en la red se estaría perjudicando demasiado los resultados obtenidos, por lo que se estaría perdiendo precisión a la hora de reproducir la red que se caracterizó anteriormente.

3.2.3 Tercera simplificación

Con esta última simplificación se pretende conocer si los resultados del flujo de carga cuando no se considera el efecto del acoplamiento magnético difieren de los resultados de un barrido que simula dicho efecto. Al igual que en las simplificaciones anteriores, se van a analizar tres escenarios de reparto de cargas. En este caso, no se utilizarían los convertidores de los nudos con carga para representar las inyecciones de corrientes de las FIDIs.

Tabla 3–11. Errores máximos absolutos de tensión ante distintos escenarios de reparto de cargas si se desprecia el efecto del acoplamiento en toda la red.

Escenario	Error máximo (V)	Nudo	Tensión
Equilibrado	3,1160	10	Fase A-N
Desequilibrio medio	4,8234	10	Fase A-N
Desequilibrio extremo	8,6325	12	Fase A-N

Tabla 3–12. Errores promedios máximos de tensión ante distintos escenarios de reparto de cargas si se desprecia el efecto del acoplamiento en toda la red.

Escenario	Error medio (V)	Nudo	Tensión
Equilibrado	1,7579	10	Fase A-N
Desequilibrio medio	2,4774	10	Fase B-N
Desequilibrio extremo	3,1337	10	Fase B-N

De nuevo, los errores más significativos se cometen en los nudos 10 y 12. Sin embargo, sus magnitudes no difieren mucho de las obtenidas en el apartado anterior, por lo que se puede concluir que la ubicación de los convertidores que simulan el acoplamiento es relevante a la hora de representar con mayor fidelidad a la red teórica modelada.

Como se mencionó anteriormente, las corrientes de acoplamiento variarán en función del valor de la impedancia de acoplamiento y de la corriente que circule por cada una de las fases. Por lo tanto, en los nudos extremos (10, 11, 12 y 13) las corrientes serán de una magnitud más pequeña que las intensidades en nudos de la rama principal o de los que surjan bifurcaciones (nudos 3, 4, 5, 6 y 7). Debido a esto, considerar acoplamiento en los nudos extremos no tendrá un efecto significativo frente a no considerar en la red ningún acoplamiento entre conductores.

Por este motivo, además de utilizar los convertidores que ya se encuentran instalados en los nudos con cargas, se decide que se añadirán convertidores adicionales en algunos nudos de la red.

3.2.4 Convertidores adicionales

Al igual que en los apartados anteriores, se va a estudiar el error cometido cuando se añaden convertidores adicionales en varios nudos del feeder. En concreto se añadirán a la red cuatro convertidores que se ubicarán estratégicamente en los nudos por los que circulen una corriente mayor. Para ello se presentan tres casos diferentes:

Tabla 3–13. Errores máximos absolutos de tensión si se añaden convertidores adicionales.

Nudos con convertidores adicionales	Escenario	Error máximo (V)	Nudo	Tensión
3, 4, 5 y 6	Equilibrado	1,4148	13	Fase C-N
	Desequilibrio medio	1,3649	13	Fase A-N
	Desequilibrio extremo	2,6618	12	Fase A-N
3, 4, 6 y 7	Equilibrado	1,4199	13	Fase B-N
	Desequilibrio medio	1,2484	13	Fase B-N
	Desequilibrio extremo	3,6767	12	Fase A-N
3, 4, 5 y 7	Equilibrado	1,4187	13	Fase B-N
	Desequilibrio medio	1,3347	13	Fase B-N
	Desequilibrio extremo	4,2849	10	Fase A-N

Tabla 3–14. Errores promedios máximos de tensión si se añaden convertidores adicionales.

Nudos con convertidores adicionales	Escenario	Error medio (V)	Nudo	Tensión
3, 4, 5 y 6	Equilibrado	0,8139	13	Fase C
	Desequilibrio medio	0,7060	13	Fase A-N
	Desequilibrio extremo	0,9935	11	Fase A-N
3, 4, 6 y 7	Equilibrado	0,8117	13	Fase B-N
	Desequilibrio medio	0,7256	13	Fase B-N
	Desequilibrio extremo	1,3169	11	Fase A-N
3, 4, 5 y 7	Equilibrado	0,8103	13	Fase B-N
	Desequilibrio medio	0,7650	13	Fase B-N
	Desequilibrio extremo	1,4684	10	Fase A-N

Dado que la simplificación que más se asemeja con la red que simula el acoplamiento en todas las fases es la primera, era de esperar que en ningún caso se pudiesen obtener unos errores menores a los cometidos en esos ensayos. Sin embargo, los resultados obtenidos al introducir convertidores adicionales mejoran el error cometido en dicha simplificación.

Para los escenarios equilibrados y con desequilibrio medio se obtienen unos errores máximos absolutos muy similares. Únicamente cuando se ubican los convertidores en la rama principal (3, 4, 5 y 6) se obtiene el error más pequeño para el caso con un desequilibrio más extremo. Además, en la Tabla 3-15 se puede apreciar que el valor medio de los errores cometidos es menor para esta disposición de convertidores en la red.

Como ya se pudo deducir en el apartado anterior, la ubicación de los convertidores es relevante a la hora de mejorar los resultados del barrido. A pesar de que las cargas de los nudos 13 y 14 son grandes, al ubicar un convertidor en el nudo 7 se estaría perjudicando el error que se acumula en los nudos más alejados, como lo son los nudos 10, 11 y 12.

Por ello, se decide que se situarán convertidores en la rama principal del feeder para simular el efecto del acoplamiento (Figura 3-6).

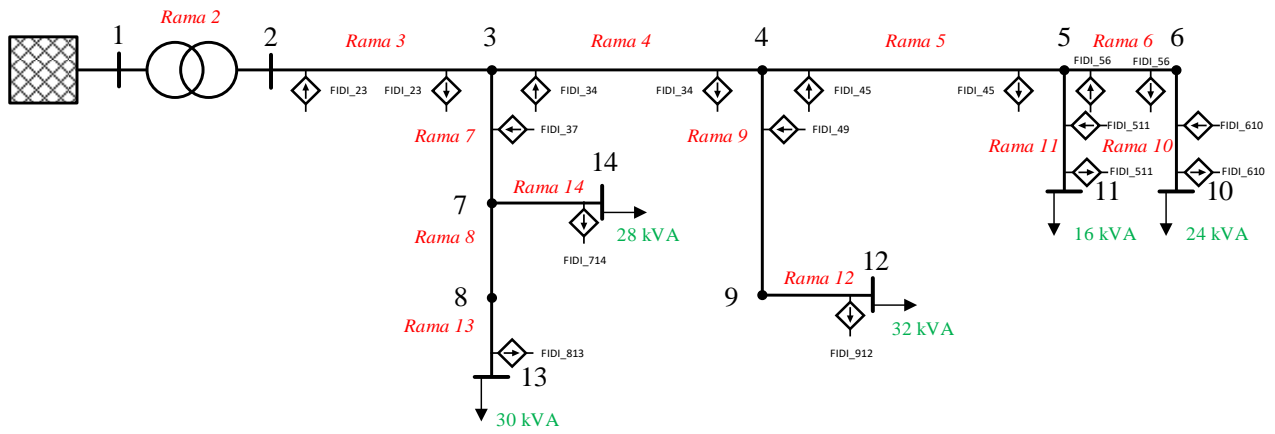


Figura 3-6. Simulación de acoplamiento magnético en los nudos 2, 3, 4, 5 y 6, y nudos con cargas.

4 SISTEMA DE SUPERVISIÓN, CONTROL Y ADQUISICIÓN DE DATOS DE REDES A ESCALA

Con el objetivo de monitorizar las redes de MT y BT instaladas en los laboratorios, así como futuras ampliaciones, se pretende implementar un Sistema de Supervisión, Control y Adquisición de Datos (SCADA). En el presente capítulo se van a detallar las características de los elementos que componen dicho sistema, el protocolo de comunicación que utilizarán, así como las funcionalidades de la versión final del SCADA.

4.1 Motivación de la implementación de un SCADA

Se puede definir como un sistema SCADA al conjunto de RTUs (de sus siglas en inglés, *Remote Terminal Units*) que recogen datos y los envían a una unidad principal a través de un sistema de comunicaciones. La unidad principal muestra los datos adquiridos por pantalla, lo que permite al operador controlar y tomar decisiones de forma remota [9].

Como ya se ha comentado al principio del presente trabajo, el laboratorio del Departamento de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de Sevilla cuenta con dos redes a escala: una red de MT y otra de BT. En los capítulos anteriores se ha modelado una nueva red de BT que podrá trabajar de manera independiente o conjunta con la subred residencial existente. Más adelante, se pretenden instalar redes híbridas, en las que convivan un sistema de corriente alterna (AC) con otro de corriente continua (DC) entre los que existirán intercambios de potencia.

Para poder monitorizar y controlar los futuros ensayos que se pudieran realizar en toda esta infraestructura, se pretende desarrollar e implementar un SCADA. Este sistema de supervisión obtendrá medidas directas de las redes, así como de los convertidores que se encargarán de actuar como cargas o generadores, y las mostrará por pantalla para que pueda llevarse a cabo un análisis en tiempo real de las redes y equipos que se encuentren en funcionamiento.

Por otro lado, se deberá tener registro de todas las variables que se monitoricen, de forma que los datos de los ensayos se puedan exportar para su posterior tratamiento y estudio.

4.2 Arquitectura del sistema SCADA

La arquitectura que se utilizará en el montaje completo del sistema SCADA se muestra en la Figura 4-1. Estará compuesta por los controladores lógicos programables (más conocidos por sus siglas en inglés, PLCs) instalados en los convertidores, un conjunto de centrales de medidas que cuantificarán las tensiones y corrientes en distintos puntos de las redes, y un ordenador en el que se instale la aplicación del SCADA para la adquisición de datos y control de los sistemas que se estén operando. A su vez, cada convertidor tendrá integrado una pantalla táctil con las que se podrán monitorizar lecturas y controlar de forma local cada dispositivo.

El protocolo de comunicación que se va a utilizar en el sistema SCADA para el intercambio de datos es Modbus. Este protocolo fue desarrollado por Modicon en 1979 y concebido con el objetivo de comunicar equipos electrónicos industriales como PLCs. Modbus está basado en una arquitectura maestro/esclavo, donde la unidad maestra se puede comunicar con una o varias unidades esclavas de manera simultánea. Solo cuando la unidad maestra requiera información, enviará un mensaje con la dirección de la RTU correspondiente [10].

Más en concreto, el tipo de protocolo utilizado en el sistema que se instale en los laboratorios será Modbus TCP/IP, el cual utiliza direcciones IP para establecer comunicaciones entre las unidades maestra y esclavas en redes Ethernet. La unidad maestra será el ordenador en el que se instale la aplicación del SCADA, que recibirá datos de las centrales de medidas ubicados en la red y de los PLCs de los propios convertidores.

Para poder conectar todos los elementos que componen la red de comunicaciones, se utilizarán conmutadores (más conocidos por su terminología en inglés, *switches*). Su función será la de interconectar todas las unidades esclavas con la unidad maestra de la red.

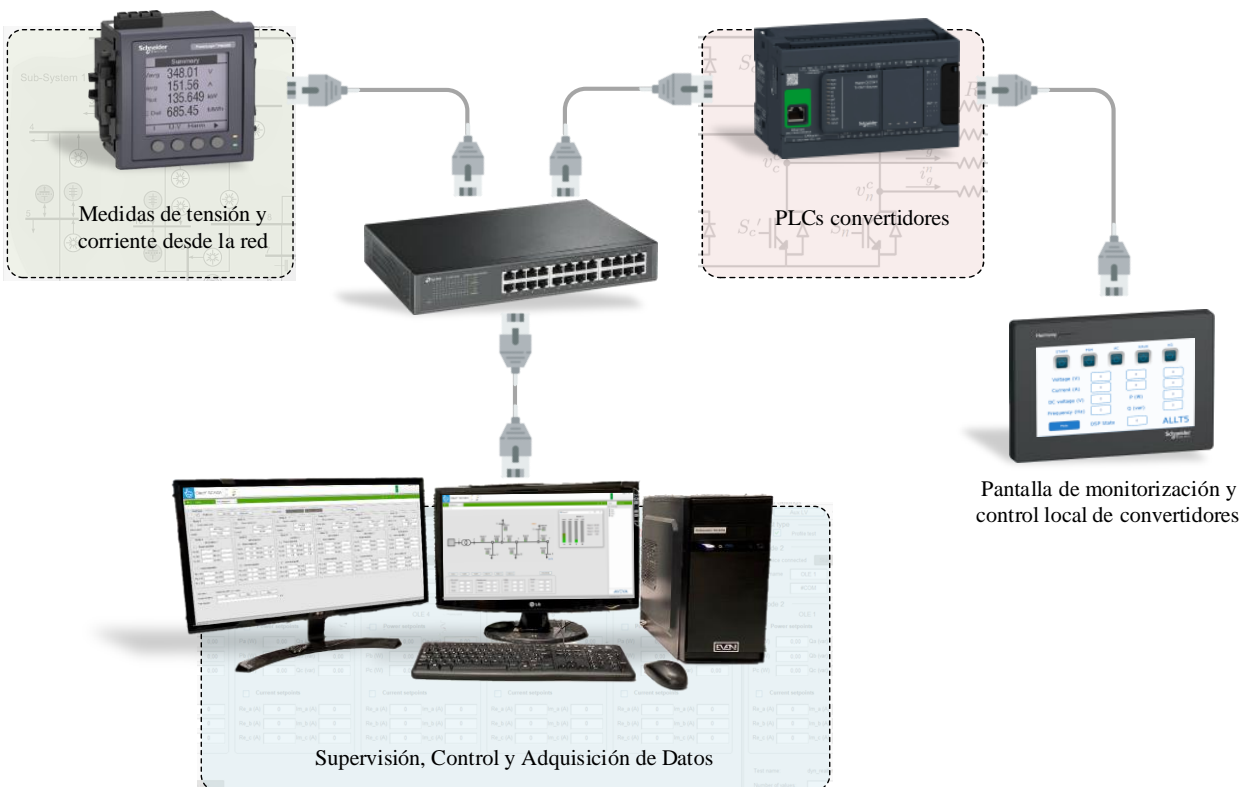


Figura 4-1. Arquitectura del sistema SCADA.

En los siguientes apartados se van a profundizar en las características principales de los elementos mencionados.

4.2.1 Controlador lógico programable (PLC)

Un PLC es un dispositivo electrónico que puede ser programado para controlar una o varias operaciones en un proceso o una máquina [11]. Cada convertidor instalado en la red cuenta con un PLC para el envío de lecturas del propio equipo al SCADA, así como la recepción de referencias desde la unidad maestra. En concreto, el controlador programable que llevan instalado es el TM241CEC24T de Schneider (Figura 4-2).

Este modelo cuenta con 24 entradas/salidas (E/S) lógicas que se utilizarán para controlar la operatividad del convertidor (accionar relés, contactores, etc.) [12]. La comunicación Modbus se realizará a través del puerto Ethernet, mediante el cual se establece la conexión con la unidad maestra y el resto de PLCs y analizadores de red. El puerto CANopen se emplea para la comunicación con el DSP (por sus siglas en inglés, *Digital Signal Processor*) instalado en la PCB (*Printed Circuit Board*) del convertidor [13].



Figura 4-2. PLC TM241CEC24T de Schneider.

Además de transmitir las lecturas hacia el SCADA, el PLC se encuentra conectado a través de Modbus a una pantalla táctil que está instalada en el convertidor, desde la cual también se puede controlar el equipo. El propósito de esta pantalla es el de poder visualizar lecturas de cada convertidor por separado además de poder operar el equipo de forma manual de manera local.



Figura 4-3. Pantalla Harmony HMISTM6400 de Schneider.

4.2.2 Analizador de red

Para poder tener información de la red, se instalarán centrales de medida PowerLogic PM5300 de Schneider. Estos analizadores ofrecen mediciones de corriente, tensión, frecuencia, factor de potencia, energía y potencia activa y reactiva [14]. El equipo cuenta con botonería para seleccionar las lecturas que se deseen visualizar desde la pantalla LCD (Figura 4-4).



Figura 4-4. Analizador de red PowerLogic PM5300.

Al mismo tiempo, el analizador de red permite el envío de las distintas medidas a través de un puerto Ethernet con el protocolo de comunicación Modbus TCP/IP. Este dispositivo puede ser conectado en redes de cuatro y tres hilos, por lo que puede ser usado en las redes de BT (3 fases + neutro) y MT (3 fases).

Para obtener lecturas de intensidad, se necesitan transformadores de corriente que adapten la magnitud medida a la intensidad nominal del analizador (5 A). En función de la previsión de intensidad máxima que circule por las ramas de las redes, se utilizarán distintos modelos de transformadores de corrientes:

Tabla 4-1. Transformadores de corrientes utilizados en las redes a escala.

Red	Fabricante	Modelo	Corriente máxima (A)
BT residencial	Schneider	METSECT5CC013	125
	Schneider	METSECT5CC015	150
BT comercial	Schneider	METSECT5CC013	125
	Schneider	METSECT5CC015	150
MT	Schneider	METSECT5CC020	200

Con el fin de asegurar la obtención de unas lecturas de corrientes fiables, se han seleccionado los modelos de transformadores de intensidad con los que se consigue una clase de precisión de entre 0,5 y 1. Para el cálculo de dicho parámetro se ha verificado que la potencia disipada por el circuito total de medición (compuesto por el dispositivo de medida y cables de conexión) no supera el límite especificado para los transformadores seleccionados [15].

4.2.3 Ordenador con SCADA

Por último, el dispositivo que hará las veces de maestro en la red de comunicación del sistema SCADA es el ordenador en el que se encuentra instalado el programa de monitorización de datos y control de equipos. El software que se ha utilizado para su desarrollo es Citect SCADA de AVEVA en su versión 2018. Con él se desarrollará la interfaz gráfica con la que interactuará el usuario del SCADA, así como la configuración para la comunicación con los equipos que se encuentran integrados en el sistema de supervisión y control del laboratorio.

Como ya se comentó con anterioridad, al ordenador del sistema llegarán lecturas de todos los dispositivos que se encuentren conectados. De esta forma, le usuario podrá monitorizar de manera remota los sistemas que se encuentren en operación y controlar de forma segura todos los equipos.

4.3 Funcionalidades del SCADA

Para el diseño del SCADA es importante conocer qué montajes se llevarán a cabo en los laboratorios. Según se encuentren en operación cada una de las redes, se podrán controlar los siguientes sistemas:

- **Red de MT**
- **Red de baja tensión:**
 - o Red Residencial
 - o Red Comercial
 - o Red Residencial + Red comercial
- **Redes híbridas:**
 - o 4 hilos AC + 2 hilos DC
 - o 2 hilos AC + 2 hilos DC

Del mismo modo, se pueden distinguir dos tipos de ensayos:

- **Ensayo con perfiles:** estarán pensados para que puedan mandarse de forma automatizada referencias a cada uno de los convertidores instalados en las redes. En consecuencia, se importarán archivos que contengan las referencias de potencias y corrientes. El usuario deberá ser capaz de visualizar previamente desde el SCADA los perfiles de los ensayos, iniciar y detener la prueba de manera segura cuando fuera necesario y exportar los datos de tendencia para su posterior análisis.
- **Ensayo manual:** está diseñado para que, en tiempo real, se puedan enviar y modificar manualmente las referencias de potencia activa, reactiva y corrientes. Del mismo modo, los datos deberán poder ser exportados para su posterior análisis.

Independientemente del tipo de ensayo y de la red que se esté operando, se deberá poder visualizar las tensiones en los nudos de la red y las corrientes por cada una de las ramas en todo momento, de forma que se pueda supervisar las caídas de tensiones y distribución de cargas por las líneas.

5 PARTICULARIZACIÓN DEL SCADA DE LA RED RESIDENCIAL

En la primera versión del sistema SCADA se ha diseñado y desarrollado el sistema de monitorización y control de la red residencial de BT. En los siguientes apartados se va a describir brevemente la topología de esta red, se profundizará en el software empleado y se comentarán las funcionalidades que se han implementado para la supervisión de la subred residencial mediante el análisis de la herramienta desarrollada.

5.1 Red residencial

El primer sistema que se ha utilizado para la supervisión y control con el SCADA es la red residencial de BT que se encuentra instalada en los laboratorios del Departamento de Ingeniería Eléctrica. Esta red es un modelo a escala de la subred residencial que se muestra en la Figura 2-2.

Se trata de una red subterránea de cuatro hilos (3F + N) que emula cargas residenciales. Al contrario de lo que ocurría con la subred comercial, en la adaptación de esta red no fue necesario redistribuir cargas, por lo que conserva las cinco cargas originales. No obstante, para adaptar la potencia a las características de los OLEs, se aplicó un FEL igual a 6 [5]. En cuanto a su topología, se han eliminado los nudos intermedios de los que no surgen bifurcaciones ni conexiones a cargas, tal y como se muestra en la Figura 5-1.

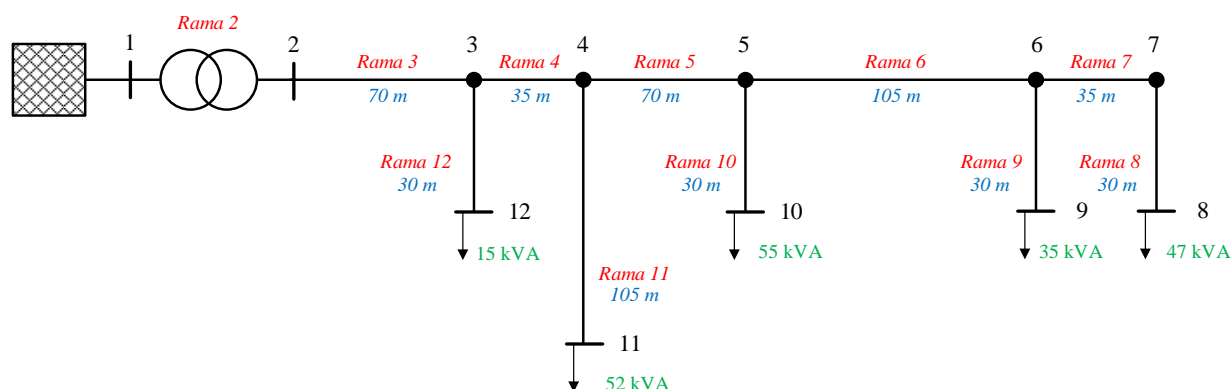


Figura 5-1. Esquema unifilar simplificado de la red residencial de BT.

En los nudos 2, 8, 9, 10, 11 y 12 se encuentran conectados los convertidores de la red. Además de los OLEs descritos anteriormente, en estos nudos se podrán conectar otros dispositivos como VSGs (de sus siglas en inglés, *Virtual Synchronous Generators*). Estos equipos podrán simular un aporte de inercia en el sistema y dar respuesta primaria para el control de estabilidad de frecuencia mediante el uso de supercondensadores [16] [17] [18].

Además de estos convertidores, será necesario utilizar un equipo adicional (Figura 5-2). Su función será la de fijar una tensión en el bus de DC común de todos los convertidores y balancear la potencia inyectada o consumida por estos [13].

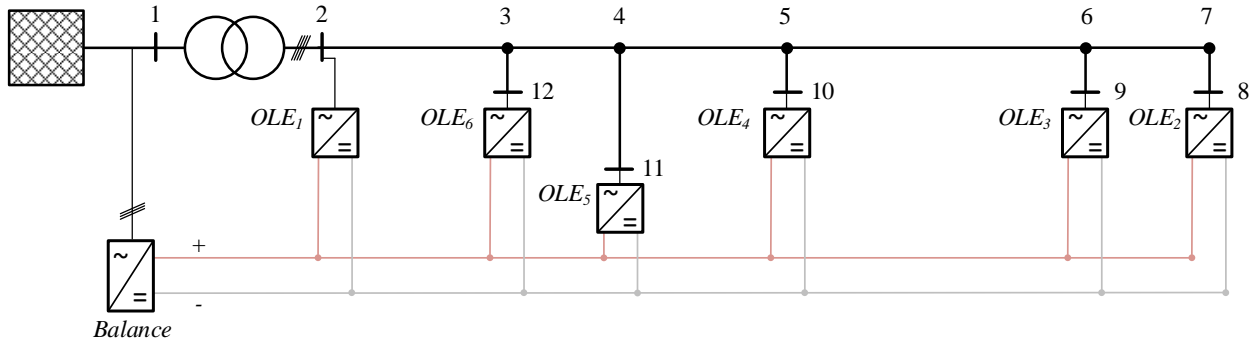


Figura 5-2. Conexión de OLEs y VSC Balance en la red residencial.

Teniendo en cuenta el número de convertidores, su función y ubicación dentro de la red residencial, se ha desarrollado el SCADA que permite la configuración de todos los parámetros de estos equipos y la monitorización de sus referencias y medidas en tiempo real.

5.2 Software

Como ya se ha indicado anteriormente, el diseño y programación del SCADA se ha llevado a cabo mediante el uso del software Citect SCADA 2018 desarrollado por AVEVA. Para la configuración y diseño del sistema de control y monitorización, el programa cuenta con dos aplicaciones:

- Citect Studio.
- Gestor de diseño.

En los siguientes apartados se van a comentar los aspectos más relevantes de cada una de estas aplicaciones.

5.2.1 Citect Studio

Desde la aplicación Citect Studio se realizará la configuración principal del SCADA. A través de ella se pueden crear, importar y gestionar proyectos, configurar dispositivos con los que se establecerán comunicaciones, crear variables, definir los directorios en los que se ubicarán los datos monitorizados, etc.

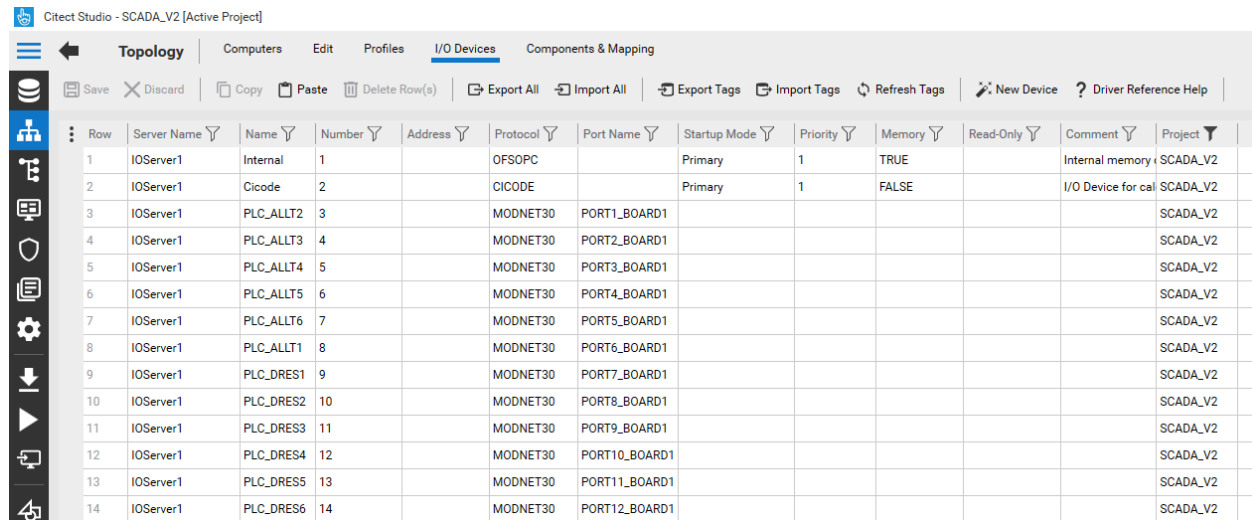
A continuación, se van a detallar un poco más de profundidad algunos aspectos relevantes de la aplicación Citect Studio.

5.2.1.1 Dispositivos de entrada/salida

El software Citect SCADA permite la comunicación directa con equipos de control y/o monitorización. Para poder recibir lecturas y enviar referencias se deberán configurar dispositivos de entrada/salida (E/S). Estos dispositivos pueden ser de dos tipos [19]:

- **Dispositivos externos:** equipos ajenos al ordenador donde se aloja el SCADA (software de simulación de controladores, autómatas, etc.).
- **Dispositivos internos:** trabajan con variables o puntos virtuales que son almacenados en el disco duro del ordenador. Estos datos no son intercambiados con ningún dispositivo externo.

La configuración de los dispositivos se realizará desde el submenú *Topology*, en la opción *I/O Devices* (Figura 5-3). Dentro de ella se podrán configurar diversos dispositivos de comunicación y los servidores a los que están asociados.



Row	Server Name	Name	Number	Address	Protocol	Port Name	Startup Mode	Priority	Memory	Read-Only	Comment	Project
1	IOServer1	Internal	1		OFSOPC		Primary	1	TRUE		Internal memory	SCADA_V2
2	IOServer1	Cicode	2		CICODE		Primary	1	FALSE		I/O Device for cal	SCADA_V2
3	IOServer1	PLC_ALLT2	3		MODNET30	PORT1_BOARD1						SCADA_V2
4	IOServer1	PLC_ALLT3	4		MODNET30	PORT2_BOARD1						SCADA_V2
5	IOServer1	PLC_ALLT4	5		MODNET30	PORT3_BOARD1						SCADA_V2
6	IOServer1	PLC_ALLT5	6		MODNET30	PORT4_BOARD1						SCADA_V2
7	IOServer1	PLC_ALLT6	7		MODNET30	PORT5_BOARD1						SCADA_V2
8	IOServer1	PLC_ALLT1	8		MODNET30	PORT6_BOARD1						SCADA_V2
9	IOServer1	PLC_DRES1	9		MODNET30	PORT7_BOARD1						SCADA_V2
10	IOServer1	PLC_DRES2	10		MODNET30	PORT8_BOARD1						SCADA_V2
11	IOServer1	PLC_DRES3	11		MODNET30	PORT9_BOARD1						SCADA_V2
12	IOServer1	PLC_DRES4	12		MODNET30	PORT10_BOARD1						SCADA_V2
13	IOServer1	PLC_DRES5	13		MODNET30	PORT11_BOARD1						SCADA_V2
14	IOServer1	PLC_DRES6	14		MODNET30	PORT12_BOARD1						SCADA_V2

Figura 5-3. Menú de configuración de dispositivos externos.

En el proceso de creación de un nuevo dispositivo dentro del proyecto, se deberá especificar si se trata de un dispositivo interno o externo. A su vez, se establecerá el protocolo de comunicación que se empleará para el intercambio de información con el SCADA. Por lo tanto, será en este apartado de configuración donde se especifiquen la dirección IP y el puerto que usará cada equipo en el protocolo de comunicaciones Modbus TCP/IP (Figuras 5-4 y 5-5).

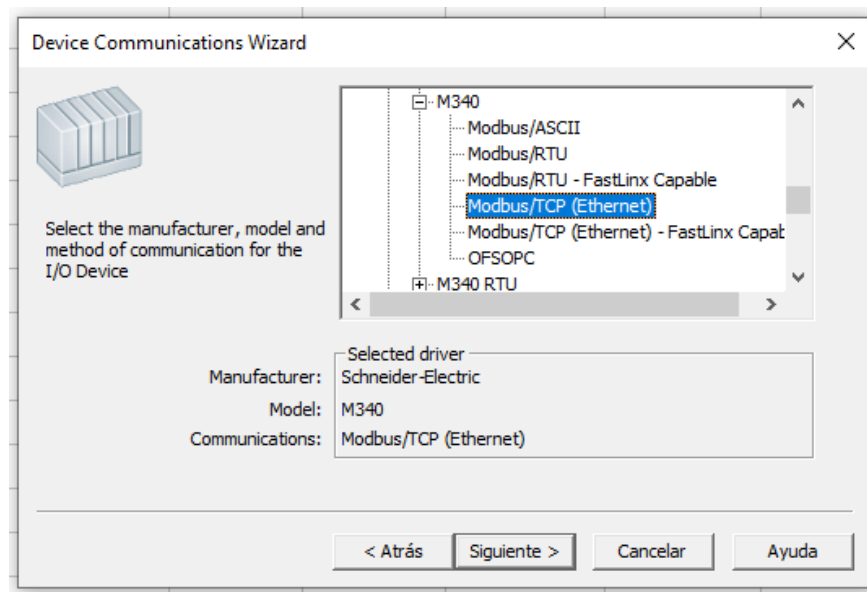


Figura 5-4. Configuración del protocolo de comunicación del dispositivo externo.

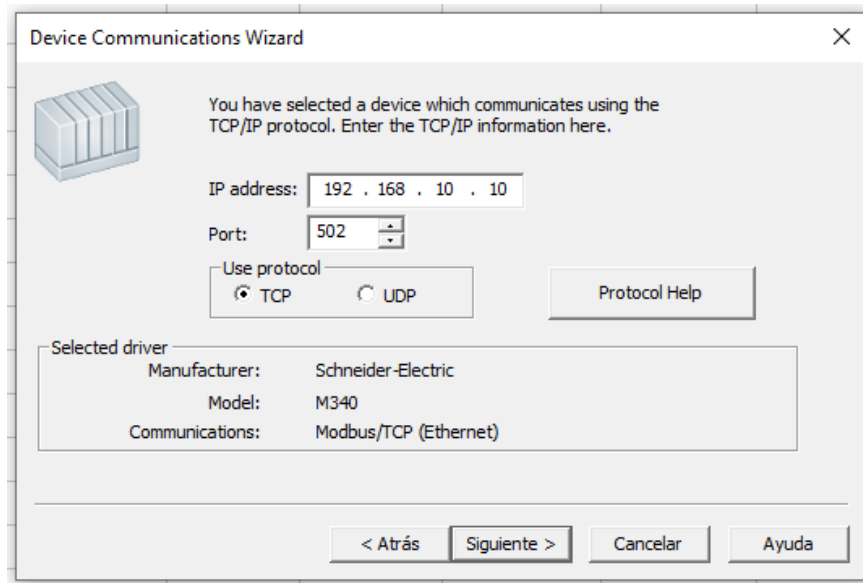


Figura 5-5. Configuración de comunicación del dispositivo externo.

5.2.1.2 Variables

Los datos de lecturas de los analizadores de red y de los PLCs se almacenarán en variables dentro del propio SCADA. Estas variables o *tags* de dispositivos se crearán desde el submenú *Model System/Variables* en Citect Studio. Estas podrán ser creadas de forma manual o importadas desde un archivo. Los tipos de variables que se podrán crear son las siguientes [19]:

- **Tags de variable:** variables que permiten trabajar directamente con los puntos reales (con un PLC físico o simulado) o virtuales (en RAM o disco duro).
- **Tags locales:** variables sin direcciones físicas que permiten guardar datos de un proceso concreto en memoria del ordenador.
- **Tags de tendencia:** se utilizan fundamentalmente para poder guardar datos y visualizar gráficamente la tendencia de una variable o el tratamiento de alguna de ellas a lo largo del tiempo.
- **Tags de alarmas:** gestionan las incidencias en el sistema.

Los tipos de tags de variable que se pueden crear son los siguientes [19]:

Tabla 5–1. Tipos de tags de variable.

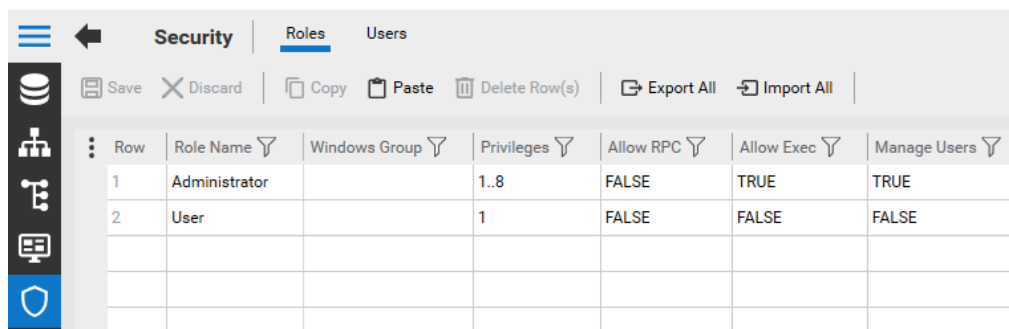
Tipo	Variable	Tamaño	Rango de valores
BCD	BCD	2 bytes	0 hasta 9.999
BYTE	Byte	1 byte	0 hasta 255
DIGITAL	Digital	1 bit o 1 byte	0 - 1
INT	Entero	2 bytes	-32.768 hasta 32.767
UINT	Entero sin signo	2 bytes	0 hasta 65.535
LONG	Entero largo	4 bytes	-2.147.483.648 hasta 2.147.483.647
LONGBCD	BCD largo	4 bytes	0 hasta 99.999.999
REAL	Valor flotante	4 bytes	-3,4e38 hasta 3,4e38
STRING	Cadena de caracteres	256 bytes	ASCII

El direccionamiento de los tags de variable se realizará de acuerdo con el mapa Modbus del dispositivo externo con el que se quiera establecer comunicación. En el Anexo II se detallan las direcciones de registro de

las variables monitorizadas de las centrales de medidas y de los PLCs de los convertidores utilizados.

5.2.1.3 Seguridad

Para acceder al sistema de supervisión que opere las redes en los laboratorios se deberá utilizar de un perfil con usuario y contraseña. Desde el menú *Security* de Citect Studio se configurarán los distintos usuarios y roles que podrán permitir el acceso a la totalidad o parte del programa diseñado, según sean los derechos de accesos que se hayan preestablecido.



Row	Role Name	Windows Group	Privileges	Allow RPC	Allow Exec	Manage Users
1	Administrator		1..8	FALSE	TRUE	TRUE
2	User		1	FALSE	FALSE	FALSE

Figura 5-6. Menú de configuración de usuarios y roles.

En Citect, la configuración de accesos se hará mediante el uso privilegios. Con ello se pretende que, una vez dentro de la aplicación del SCADA, cada tipo de usuario tenga acceso a las pantallas y funcionalidades que se encuentren dentro de los privilegios de cada rol. Por ejemplo, se podrían crear usuarios que sólo tuviesen acceso a un determinado tipo de ensayo o a la visualización y exportación de datos de tendencias desde el SCADA. No obstante, en la primera versión de la aplicación solo se ha desarrollado un único usuario con todos los privilegios.

5.2.1.4 Editor Cicode

Desde el menú de Citect Studio se puede acceder al editor Cicode, desde el cual se podrá hacer uso del lenguaje de programación Cicode para la dotar de funcionalidades a los elementos gráficos que se implementen desde la aplicación Gestor de diseño, como para automatizar procesos, inicializar variables, etc. Este lenguaje de programación es similar a los lenguajes Visual Basic o C, y fue diseñado para la monitorización de instalaciones y el control de aplicaciones [19].

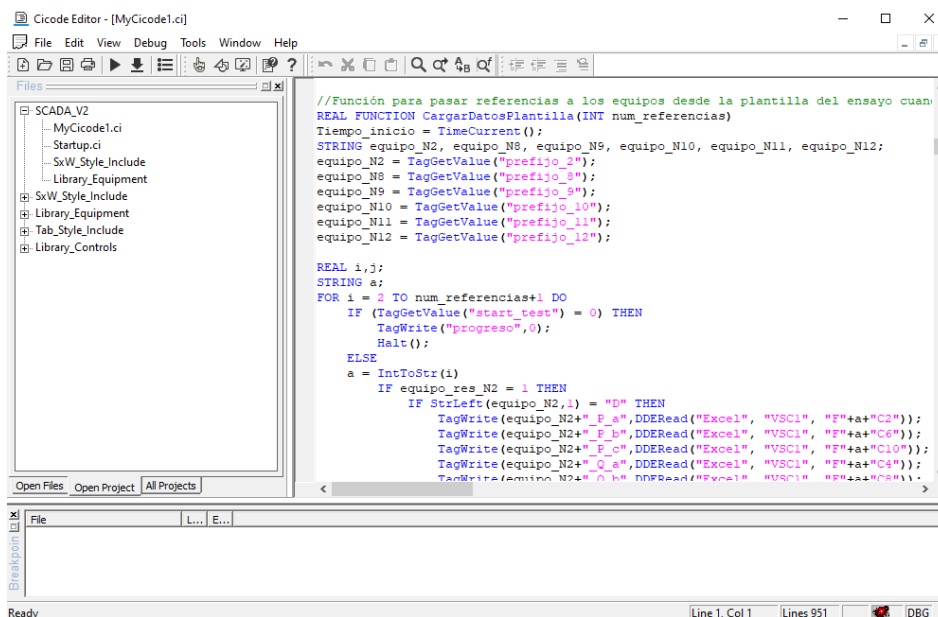


Figura 5-7. Editor Cicode.

5.2.2 Gestor de diseño

Desde esta otra aplicación de Citect se pueden crear o editar los elementos gráficos del sistema de supervisión y control [19]:

- **Páginas gráficas:** se corresponden con las distintas ventanas que tendrá el programa que se esté desarrollando. Es el elemento gráfico principal.
- **Plantillas:** los diseños de páginas gráficas pueden ser guardadas como plantillas que podrán ser reutilizadas en otros proyectos.
- **Símbolos:** elementos gráficos cuyo aspecto puede cambiar en tiempo de ejecución.
- **Genios:** grupo de objetos gráficos agrupados formando un único elemento con características propias de animación y que pueden tener asociadas, o no, llamadas a funciones.
- **Supergenios:** páginas dinámicas o emergentes que permiten transferir información a otras páginas durante la ejecución del programa. Estos pueden ser guardados en librerías y ser utilizados en otros proyectos.

Del mismo modo, para el diseño de cada uno de los elementos descritos, existe la posibilidad de añadir desde la barra de herramientas del editor gráfico (Figura 5-8) elementos con los que se puedan interactuar (botones y grupos de símbolos) o representar visualmente información (texto, números, líneas y polígonos, tendencias, etc.).

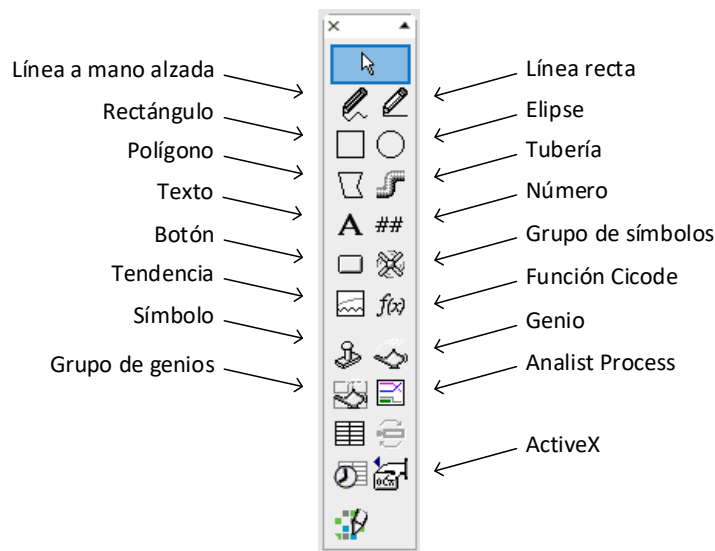


Figura 5-8. Barra de herramientas del Gestor de diseño.

5.3 Funcionalidades implementadas en el SCADA

En este apartado se van a analizar las funcionalidades que se han implementado en la aplicación del SCADA que se instalará en el equipo maestro desde el que se monitoriza y controla la red. Dichas funcionalidades se pueden relacionar con el proceso que hay que realizar para desarrollar un ensayo en la red que se esté operando o con la exportación o visualización gráfica de tendencias de datos. En la Figura 5-9 se representa el diagrama de flujo de la aplicación, que esquematiza el contenido de los apartados que se van a exponer a continuación.

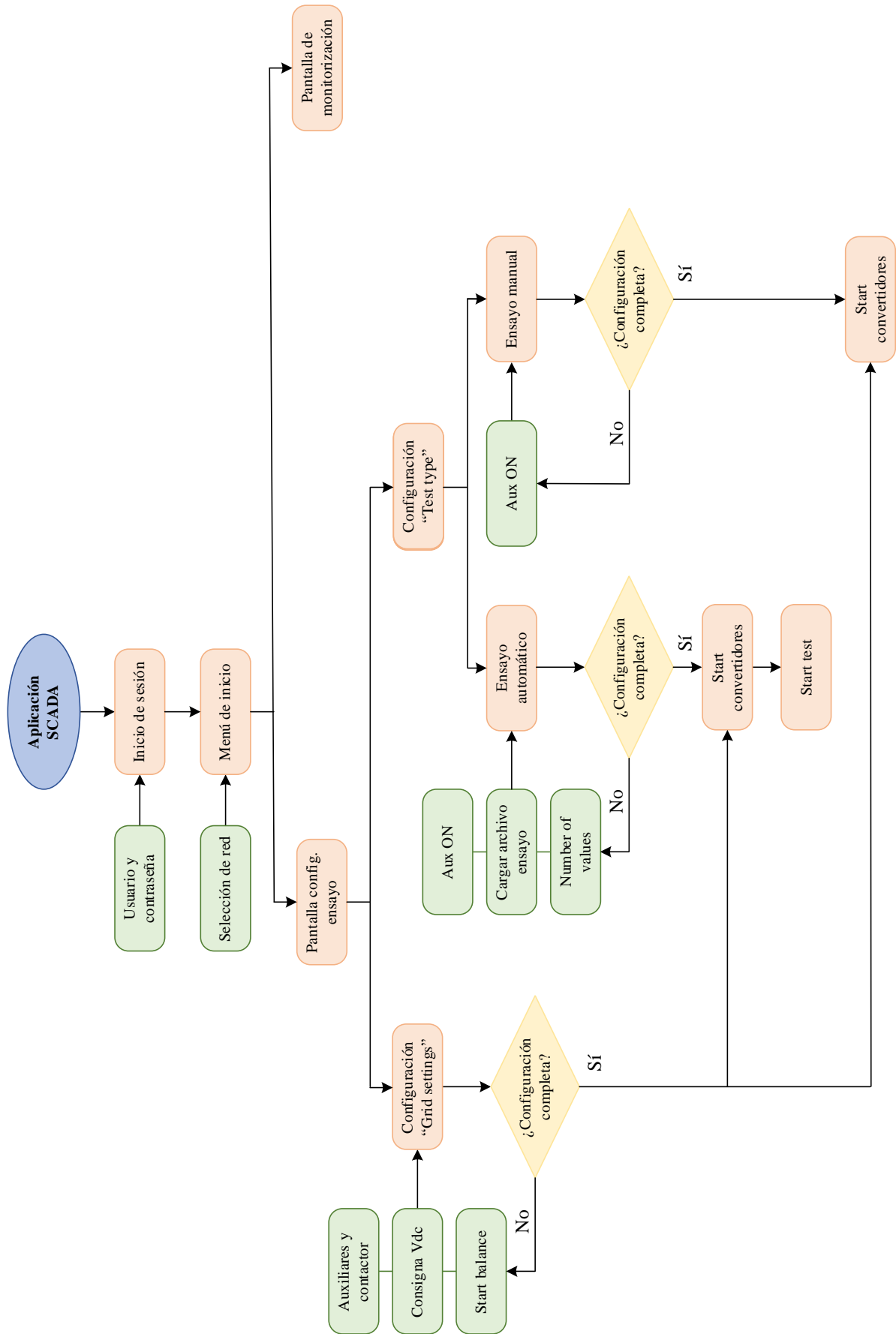


Figura 5-9. Diagrama de flujos de la aplicación del SCADA.

5.3.1 Pantalla de inicio

Al iniciar el SCADA, el usuario deberá iniciar sesión para poder acceder a su contenido. Una vez dentro, se mostrará un menú de inicio en el que deberá seleccionar con qué red van a realizar pruebas (Figuras 5-10 y 5-11). Una vez seleccionada la red, aparecerán dos pantallas con las que se configurarán los ensayos y se monitorizarán los parámetros de la red.

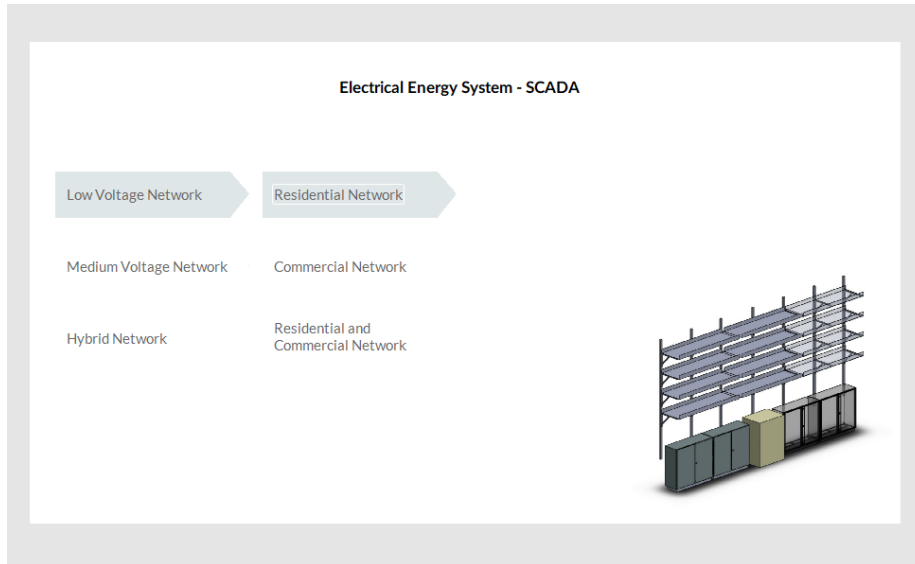


Figura 5-10. Menú inicial de selección de redes de baja tensión.

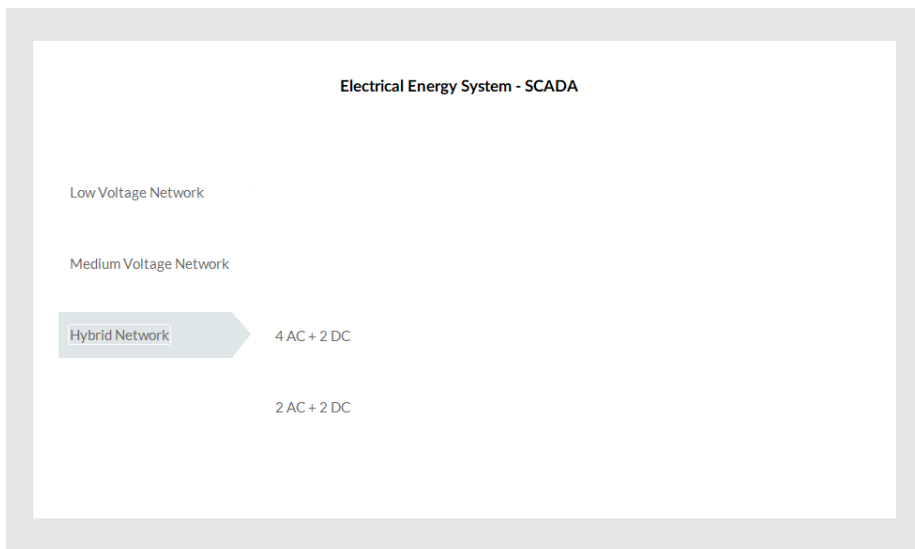


Figura 5-11. Menú inicial de selección de redes híbridas.

Como ya se indicó al principio del capítulo, de todos los sistemas que se muestran en el menú de inicio, el único que se ha desarrollado en el SCADA es la red residencial de BT. No obstante, el contenido que aparecerá en las pantallas deberá ser similar para las otras redes. En los siguientes apartados se van a explicar en detalle cada una de las funcionalidades que se han implementado.

5.3.2 Pantalla de configuración de ensayos

Desde esta primera pantalla se podrá configurar y controlar la prueba que se quiera realizar en la red. La información que se muestra en ella irá apareciendo o desbloqueándose conforme el usuario avance en su configuración.

La primera vez que se muestra esta pantalla, tan solo estarán visibles dos menús en la parte superior de la misma: *Grid settings* y *Test type* (Figura 5-12).

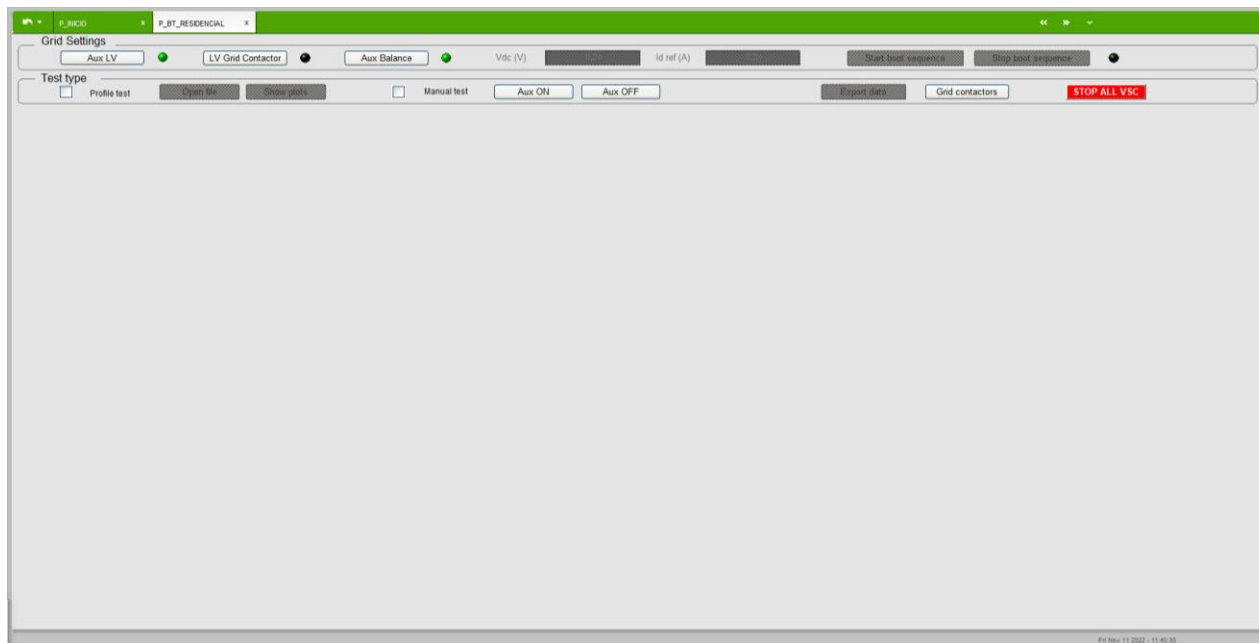


Figura 5-12. Vista inicial de la pantalla de configuración de ensayos.

5.3.2.1 Menú *Grid Settings*

Desde *Grid Settings* se establecerán las condiciones para arrancar el convertidor de balance, cuya función será la de fijar la tensión en el bus DC. En este menú se pueden distinguir los siguientes botones y campos:

- **Aux LV:** alimenta los PLCs y pantallas de los convertidores conectados en los nudos con generación o consumo.
- **LV Grid Contactor:** cierra contactor principal que conecta la red de BT con la de los laboratorios.
- **Aux Balance:** dará servicio al PLC, pantalla y auxiliares del convertidor de balance.
- **Vdc:** referencia de tensión que deberá fijar el convertidor de balance en el bus DC.
- **Id ref:** referencia de corriente que se manda al balance cuando se requiera que inyecte potencia reactiva en su punto de conexión con la red general del laboratorio.
- **Start boot sequence:** arranque del convertidor de balance.
- **Stop boot sequence:** parada del convertidor de balance.

Para poder poner en marcha el convertidor de balance, se deberán configurar los parámetros necesarios para poder desbloquear el botón *Start boot sequence*. Para ello se activarán los botones *Aux LV*, *LV Grid Contactor* y *Aux Balance*. La referencia de tensión en el bus DC se establecerá completando el campo *Vdc*. Una vez se hayan realizado estos pasos, se desbloqueará el botón de arranque¹.

¹ El campo *Id ref* solo se deberá completar cuando se quiera inyectar potencia reactiva con el convertidor de balance.

5.3.2.2 Menú *Test type*

Por otro lado, en el menú *Test type* se podrá elegir el tipo ensayo a realizar. Inicialmente, en este apartado de configuración se encuentran disponibles los siguientes campos y botones:

- **Profile test:** muestra la configuración para la realización de un ensayo automático.
- **Manual test:** muestra la configuración para la realización de un ensayo manual.
- **Aux ON:** activa el relé que alimenta las fuentes de tensión auxiliares de los convertidores.
- **Aux OFF:** desactiva el relé que alimenta las fuentes de tensión auxiliares de los convertidores.
- **Grid contactors:** muestra el menú de apertura y cierre de contactores principales del armario de potencia que conecta las redes a escala a la red de los laboratorios o a una fuente de tensión.
- **Stop all VSC:** para la conmutación de todos los convertidores que se encuentran en funcionamiento. Solo se deberá utilizar en caso de emergencia.

El contenido que se muestra en la pantalla será diferente según el tipo de ensayo que se seleccione:

- Profile test

La opción *Profile test* se utilizará para realizar ensayos automáticos. Al marcarla se desbloquearán los botones *Open file* y *Show plots* (Figura 5-13).

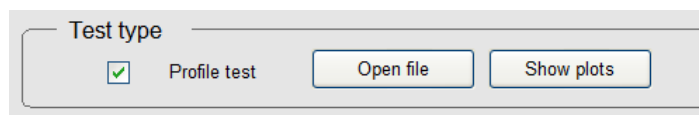


Figura 5-13. Menú de configuración de ensayos automáticos.

Por un lado, el botón *Open file* permitirá al usuario seleccionar el archivo en el que se encuentran las consignas que se mandarán a los convertidores. Para que el SCADA pueda mandar las referencias correspondientes a cada equipo, es fundamental que el archivo tenga una estructura que se mantenga para todos los ensayos automatizados que se realicen en el alimentador residencial. Por ello, se ha creado una plantilla con un archivo de tipo *.xlsx* (Figura 5-14). Las referencias de potencias y corrientes de cada convertidor, que simularán la generación o consumo en un nudo concreto y el efecto del acoplamiento magnético en las ramas, han sido organizadas por hojas dentro del archivo del ensayo. Para la lectura y envío de referencias a los PLCs de los convertidores se ha utilizado el lenguaje de programación Cicode.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	
1	t (s)	P _a (W)	t (s)	Q _a (VAr)	t (s)	P _b (W)	t (s)	Q _b (VAr)	t (s)	P _c (W)	t (s)	Q _c (VAr)	t (s)	Re
2	1	-1188,4452	1	-895,1430	1	-19,8074	1	-537,0858	1	-358,0572	1	0,0000	1	
3	2	-1219,3774	2	-918,4413	2	-20,3230	2	-551,0648	2	-367,3765	2	0,0000	2	
4	3	-1236,7583	3	-931,5327	3	-20,6126	3	-558,9196	3	-372,6131	3	0,0000	3	
5	4	-1243,4806	4	-936,5960	4	-20,7247	4	-561,9576	4	-374,6384	4	0,0000	4	
6	5	-1242,4367	5	-935,8097	5	-20,7073	5	-561,4858	5	-374,3239	5	0,0000	5	
7	6	-1236,5192	6	-931,3526	6	-20,6087	6	-558,8115	6	-372,5410	6	0,0000	6	
8	7	-1228,6204	7	-925,4032	7	-20,4770	7	-555,2419	7	-370,1613	7	0,0000	7	
9	8	-1221,3370	8	-919,9173	8	-20,3556	8	-551,9504	8	-367,9669	8	0,0000	8	
10	9	-1214,6895	9	-914,9104	9	-20,2448	9	-548,9462	9	-365,9641	9	0,0000	9	
11	10	-1207,3722	10	-909,3989	10	-20,1229	10	-545,6393	10	-363,7596	10	0,0000	10	
12	11	-1198,1632	11	-902,4626	11	-19,9694	11	-541,4776	11	-360,9851	11	0,0000	11	
13	12	-1187,1294	12	-894,1520	12	-19,7855	12	-536,4912	12	-357,6608	12	0,0000	12	
14	13	-1175,2668	13	-885,2170	13	-19,5878	13	-531,1302	13	-354,0868	13	0,0000	13	
15	14	-1163,5802	14	-876,4146	14	-19,3930	14	-525,8488	14	-350,5658	14	0,0000	14	
16	15	-1152,8150	15	-868,3062	15	-19,2136	15	-520,9837	15	-347,3225	15	0,0000	15	
17	16	-1143,4565	16	-861,2573	16	-19,0576	16	-516,7544	16	-344,5029	16	0,0000	16	
18	17	-1135,8699	17	-855,6124	17	-18,9227	17	-513,2680	17	-342,2454	17	0,0000	17	

Figura 5-14. Estructura de un archivo de ensayo automático.

Una vez seleccionado el ensayo, el botón *Show plots* mostrará en una ventana emergente las gráficas de los perfiles de potencia activa, reactiva y corrientes real e imaginaria del archivo del ensayo (Figura 5-15). Para realizar estas gráficas interactivas se han combinados los lenguajes de programación Cicode y Python. En concreto, se ha utilizado la librería Bokeh de Python, la cual ofrece más posibilidades a la hora de mostrar gráficamente los datos recogidos en el archivo.

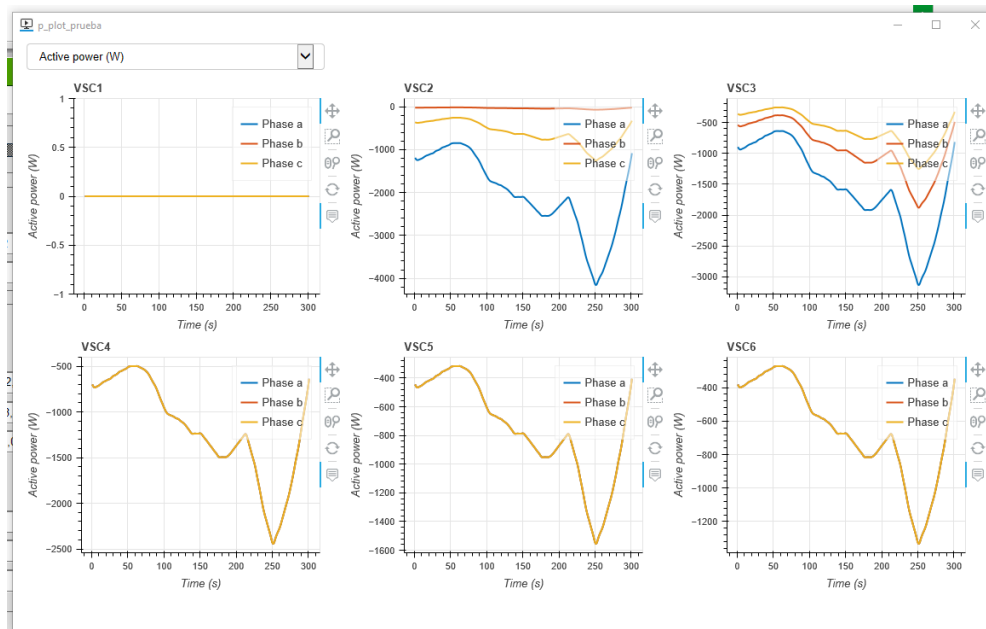


Figura 5-15. Perfiles de potencia activa del archivo de ensayo.

Si en un ensayo no se va a contar con generación o consumo en algunos de los nudos con convertidores, se podrá desmarcar la casilla *Device connected* para que desde el ordenador del SCADA no mande referencias. Si por el contrario el nudo tiene un convertidor conectado, se dejará marcada (Figura 5-16). En este último caso, junto a la casilla se mostrará el nombre del equipo, el tipo de control del convertidor, los botones *Start* y *Stop* y los indicadores *Aux* y *Start*.

The figure displays a control interface for two nodes. Node 2 has a 'Device connected' checkbox which is unchecked. Node 8 has a 'Device connected' checkbox which is checked, accompanied by 'Start' and 'Stop' buttons. Below this, Node 8's configuration is shown for 'OLE 2', including 'Device name' (OLE 2), 'Control' (#COM), and 'Aux' and 'Start' indicator lights. Under 'Power setpoints', there are input fields for Pa (W), Pb (W), Pc (W), Qa (var), Qb (var), and Qc (var), all set to 0,00. Under 'Current setpoints', there are input fields for Re_a (A), Re_b (A), Re_c (A), Im_a (A), Im_b (A), and Im_c (A), all set to 0.

Figura 5-16. Información de equipos en cada nudo.

Al indicar que en el nudo existe un convertidor, el equipo que aparecerá conectado por defecto será un OLE. Seleccionando el nombre del equipo aparecerá un menú en el que se podrá cambiar por un VSG. El campo *Control* permitirá elegir el tipo de control del convertidor.

Al igual que ocurría con el botón de arranque del convertidor de balance, el botón *Start* de los convertidores estará bloqueado hasta que los auxiliares del convertidor estén alimentados y exista un valor de tensión mínimo en el bus DC. Para ello, se deberá pulsar el botón *Aux ON* y mantener una tensión con el balance. Los indicadores *Aux* y *Start* mostrarán de forma visual si los auxiliares del equipo están alimentados y si el convertidor está arrancado, respectivamente.

Una vez arrancados todos los convertidores involucrados en la prueba, el usuario deberá indicar el número de valores de referencias se desean mandar desde el archivo del ensayo. Para ello deberá completar el campo *Number of values* ubicado en la parte inferior de la pantalla. Junto a este campo aparecerá el nombre del ensayo que se ha seleccionado previamente y una barra de progreso que irá completándose conforme se avanza en el envío de consignas (Figura 5-17).

En este punto se habrá completado la configuración del ensayo automático y el botón *Start test* estará desbloqueado. Al pulsarlo, el SCADA comenzará a realizar el envío de consignas a los convertidores.

Figura 5-17. Información del ensayo automático y controles de inicio y parada.

En el momento en el que da comienzo el ensayo, todos los campos y botones de la pantalla quedarán bloqueados con la finalidad de que no se interrumpa el envío de referencias. Los únicos botones que quedarían operativos serían *Stop test* y *Stop all VSC*.

El primero de ellos detendría el ensayo realizando una rampa de bajada de diez segundos de duración, con el objetivo para detener los convertidores de forma segura. Para ello se tendrán en cuenta los últimos valores de referencias recibidos por los convertidores en el momento en el que se detiene el ensayo.

El botón *Stop all VSC* pararía automáticamente la conmutación de todos los convertidores. Como ya se ha indicado, este botón solo se deberá utilizar en casos concretos en los que se requiera una parada simultánea de todos los convertidores.

Los datos de la prueba podrán ser exportados a un archivo *.xlsx* una vez que haya finalizado. Esto se realizará haciendo clic en el botón *Export data* que aparecerá desbloqueado en el menú *Test type* una vez concluya el envío de referencias. De la misma forma que aparecían las consignas de los equipos en el archivo del ensayo, los datos exportados contendrán las lecturas de potencias y corrientes de cada uno de los equipos ordenados por hojas.

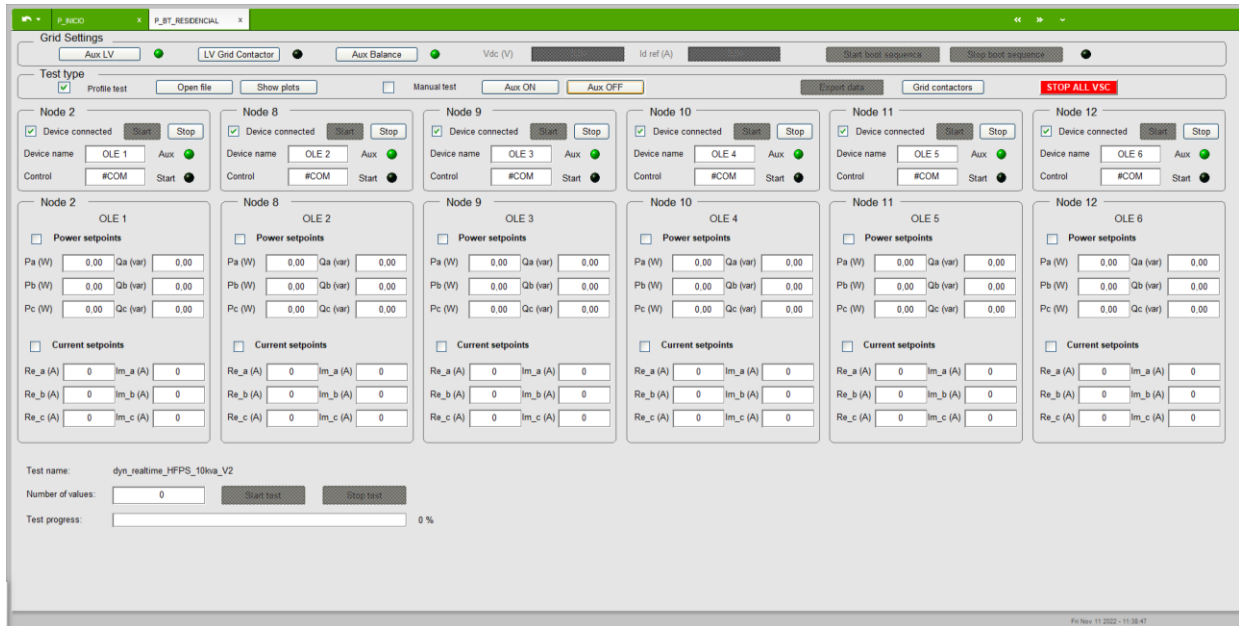


Figura 5-18. Pantalla completa de configuración de ensayo automático.

- Manual test

En el caso en el que marque la opción *Manual test* en el menú *Test type*, en la pantalla aparecerán los campos en los que se podrán insertar manualmente las consignas que se enviarán a cada equipo. Estas consignas serán diferentes según se trate de un OLE o un VSG (Figura 5-19).

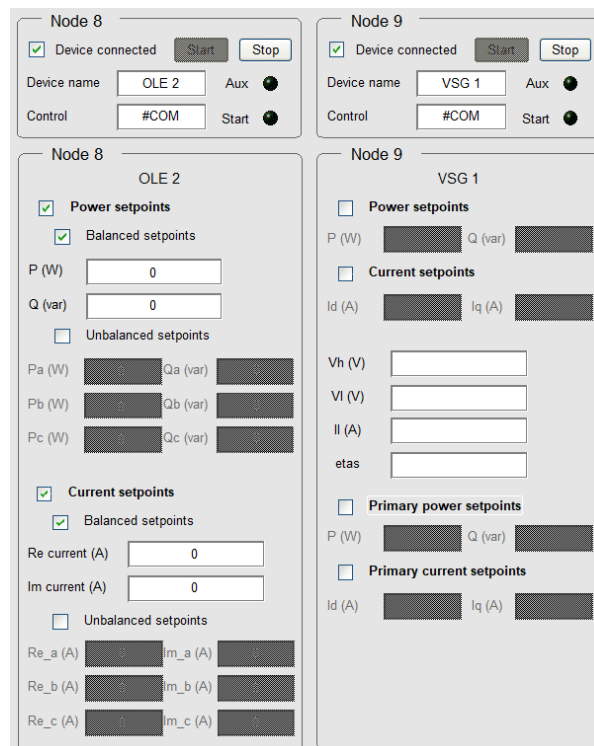


Figura 5-19. Menú de configuración de consignas de un OLE y un VSG en un ensayo manual.

Los OLEs podrán recibir referencias de potencia y corriente de forma equilibrada o desequilibrada. Si se desea mandar las mismas consignas a cada una de las fases, se marcará la opción *Balanced setpoints*. En caso contrario, cuando sea conveniente enviar consignas distintas a cada fase, se marcará la opción *Unbalanced setpoints*.

Por otro lado, en esta primera versión del SCADA solo se ha implementado la referencia de consignas equilibradas de potencias y corrientes en los VSGs. No obstante, se cuenta con campos adicionales que configuran adecuadamente estos dispositivos.

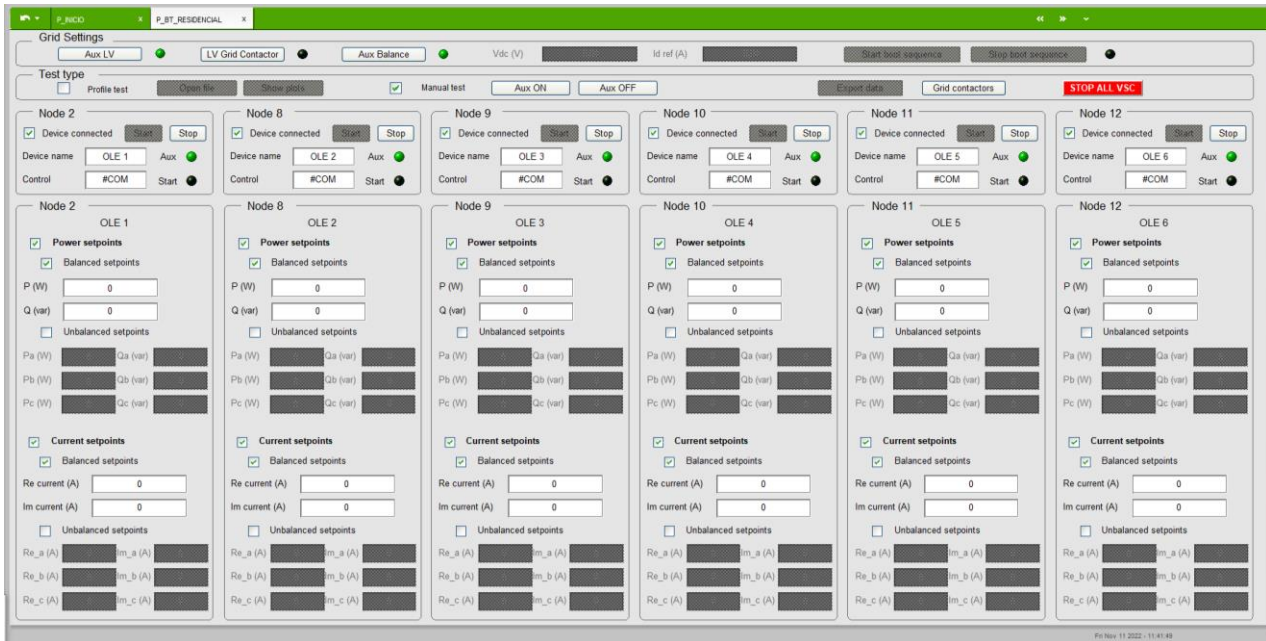


Figura 5-20. Pantalla completa de configuración de ensayo manual.

En definitiva, el procedimiento de configuración de ensayos estará precedido de la configuración del convertidor de balance para que pueda dar comienzo el envío de consignas a los equipos que se encuentren conectados, ya sea desde un archivo o de forma manual.

Sin embargo, es importante remarcar que, a diferencia de los ensayos automáticos, los ensayos manuales no dispondrán de un botón para que dé comienzo el ensayo. De esta forma, las referencias que se indiquen en los campos de esta pantalla del SCADA se mandarían automáticamente al equipo correspondiente si se encuentra arrancado. No obstante, el botón *Stop all VSC* seguirá estando operativo con el fin de detener todos los equipos de forma simultánea cuando fuera necesario.

5.3.3 Pantalla de monitorización

En la segunda pantalla que aparecerá en el SCADA al seleccionar la red residencial, se mostrarán las lecturas de todos los analizadores de red y de los PLCs de los convertidores. Lo que se pretende con esta pantalla es que el usuario pueda reconocer el estado en el que se encuentra la red en tiempo real y le permita tomar decisiones en caso de detectar un mal funcionamiento.

Uno de los elementos gráficos a destacar de esta pantalla es un esquema unifilar de la red residencial (Figura 5-21). Según la configuración de equipos que se haya realizado en la pantalla anterior, en los nudos con cargas aparecerán los nombres del convertidor conectado. A su vez, junto a cada nombre se mostrará un botón que abrirá en una nueva ventana el menú de configuración del equipo.

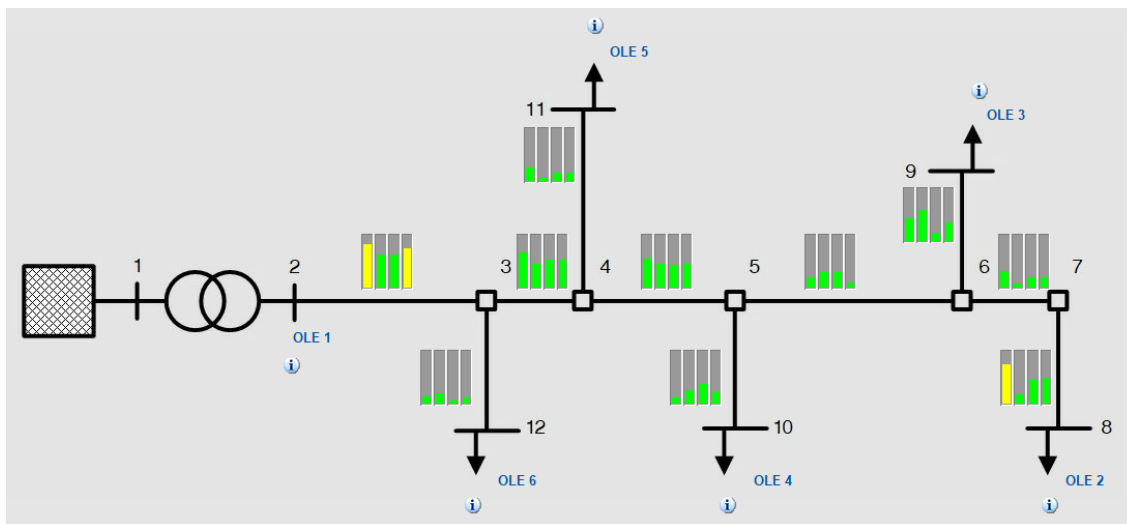


Figura 5-21. Esquema unifilar de la red residencial en el SCADA.

Sobre cada una de las ramas del convertidor, aparecerá un pequeño gráfico con cuatro barras. Estas mostrarán el nivel de corriente por cada una de las fases y el neutro, respecto de la corriente máxima admisible por esa rama. Para obtener más información de cada rama, el usuario podrá pasar el ratón sobre cada uno de estos gráficos, con lo que se mostrará cuál es la tensión en cada uno de los nudos extremos de la rama y las magnitudes de corrientes. Estas medidas aparecerán a la derecha de la pantalla de monitorización junto con información del estado de la red (Figura 5-22).

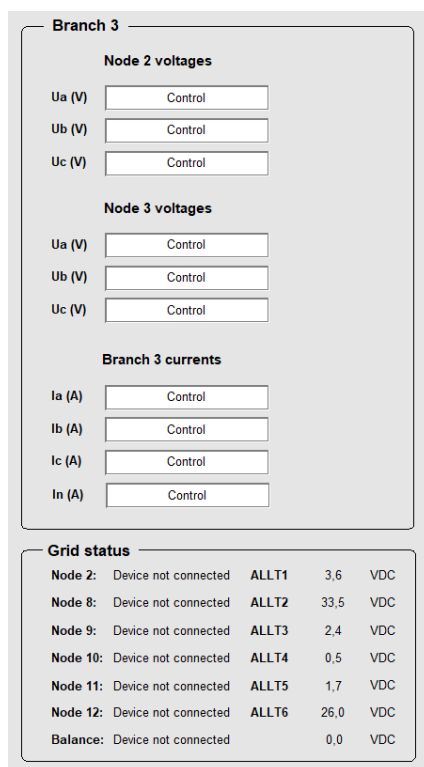


Figura 5-22. Lecturas de corrientes por la rama y medidas de tensión en los nudos extremos, y estado de la red.

En la parte inferior de la pantalla aparece un resumen de las tensiones, corrientes y potencias activa y reactiva de los equipos conectados en los nudos con cargas (Figura 5-23). Para cambiar la información que se muestra, se utilizarán los botones que se encuentran ubicados en la parte superior de estas lecturas.

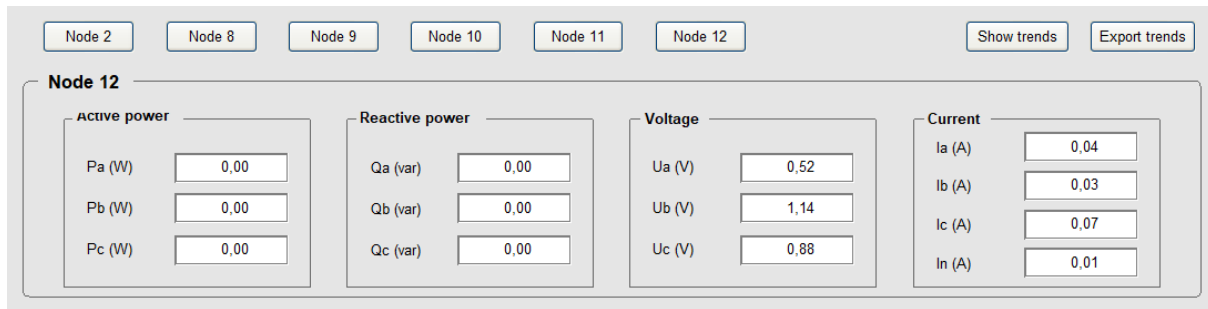


Figura 5-23. Lecturas de potencias, tensión y corriente de los convertidores.

Otras de las funcionalidades a destacar en esta pantalla son los botones *Show trends* y *Export trends*. El primero de ellos abrirá una nueva ventana en la que se visualizarán los gráficos de tendencia de potencias activa y reactiva, y de tensiones y corrientes de cada uno de los convertidores (Figura 5-24). Estos gráficos mostrarán la variación de dichas magnitudes en una ventana de tiempo que el usuario podrá modificar. Los datos guardados como tendencias estarán disponibles durante 30 días, por lo que se podrán recuperar datos de ensayos realizados en el último mes.

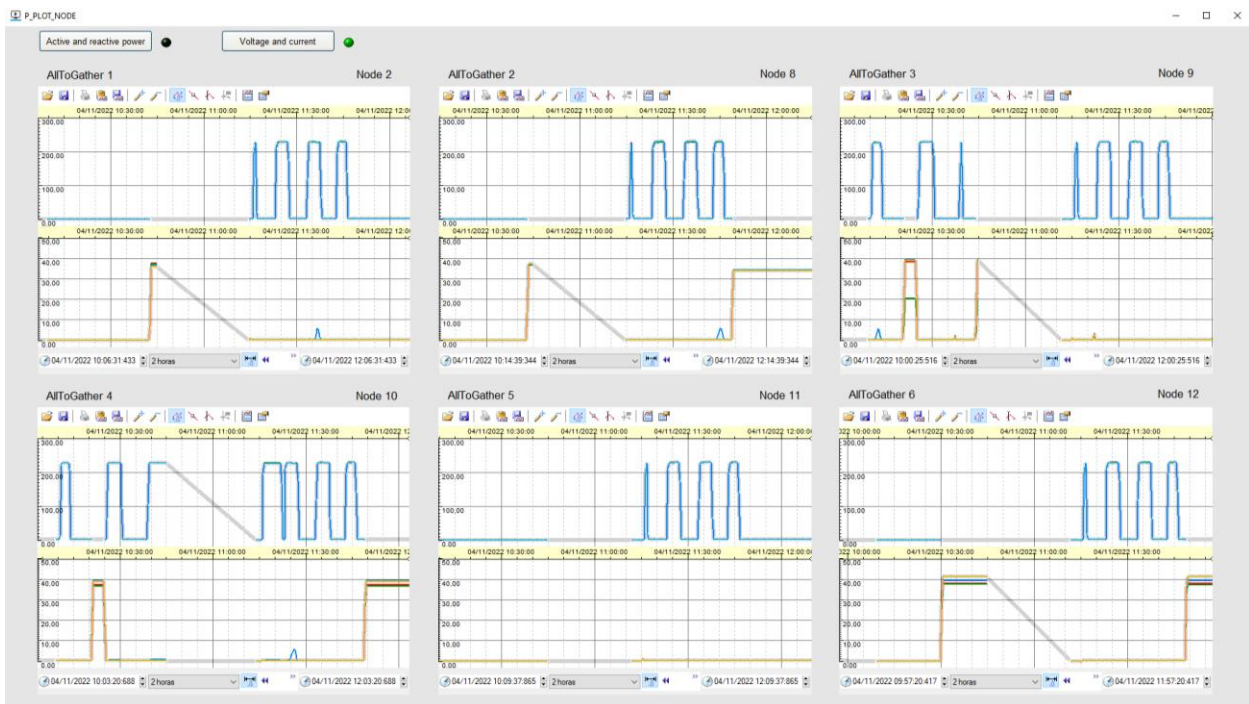


Figura 5-24. Gráficos de tendencia de tensiones y corrientes.

Por último, el botón *Export trends* ofrece la posibilidad de exportar los datos de tensiones, corrientes y potencias de cada una de las fases de los convertidores a un archivo tipo *.xlsx*. Para facilitar su tratamiento, los datos de cada uno de los convertidores estarán dispuestos en hojas distintas dentro del mismo archivo. A su vez, el usuario podrá indicar de qué equipos desea obtener información, el intervalo de tiempo que desea guardar, así como el nombre del ensayo que ha realizado (Figura 5-25).

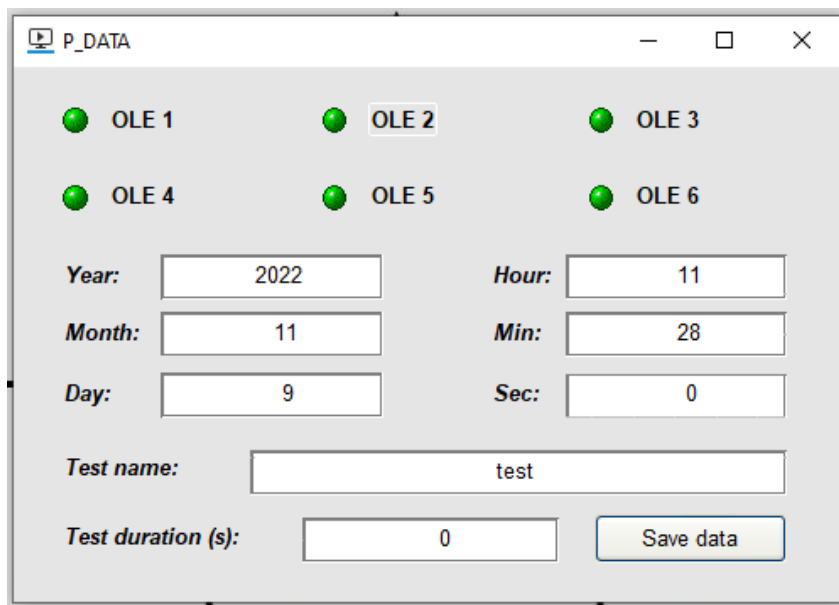


Figura 5-25. Ventana de configuración de exportación de datos.

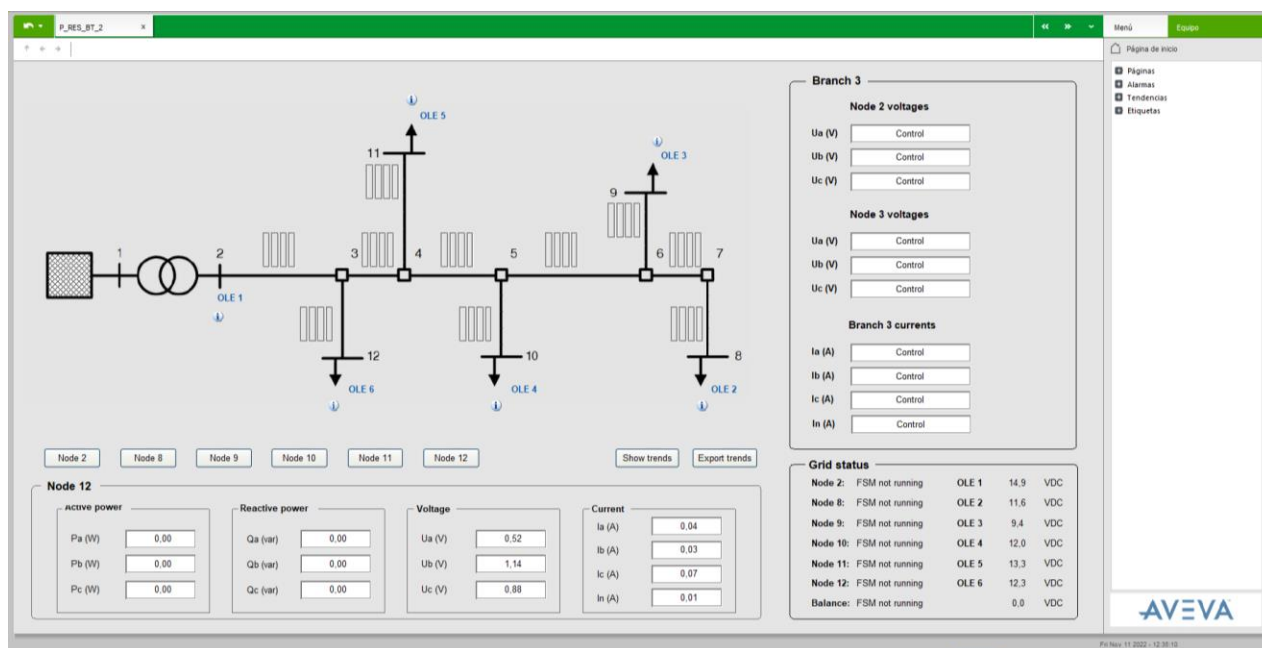


Figura 5-26. Pantalla de monitorización completa.

6 CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

En el Trabajo Fin de Máster se ha diseñado y modelado una red de BT con la finalidad de ser montada en los laboratorios del Departamento de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de Sevilla. En el proceso se ha realizado una adaptación de la red teórica para ajustarla a las limitaciones de las capacidades de la infraestructura y de los recursos disponibles. Para ello se ha realizado una nueva distribución de cargas en el alimentador y se ha aplicado un factor de escala que buscara un compromiso entre las limitaciones de los convertidores y los valores comerciales de resistencias y bobinas que se adquiriesen para el montaje físico de la red.

Por otro lado, para tratar de reproducir la línea aérea teórica propuesta, se han considerado los valores de resistencia interna de las bobinas comerciales antes de seleccionar los valores de resistencias. Con todo esto, se ha conseguido que tanto la longitud de los tramos de líneas como la distancia entre conductores se asemeje a la red utilizada como referencia.

A su vez, se ha obtenido el modelo trifásico del transformador que se utilizará en los laboratorios para emular el transformador de cabecera de MT/BT. Posteriormente, se ha realizado un flujo de cargas para comparar los resultados obtenidos en la red teórica y la red caracterizada, obteniéndose una evolución similar de la caída de tensión en ambas redes.

Para simular el acoplamiento magnético entre conductores, se ha estudiado de qué depende este efecto y cómo puede ser emulado a partir de FIDIs. Dadas las limitaciones relacionadas con el número de equipos para poder reproducir dicho efecto, se han realizado varias simplificaciones y se ha estudiado la magnitud del error que se comete en cada una de ellas ante distintos escenarios de desequilibrios de cargas. Finalmente, se ha decidido incluir convertidores adicionales en algunos nudos estratégicos para obtener unos resultados más precisos. Es importante indicar que el error que se comete con la solución final es inferior al error esperado. Para tratar de analizar estos resultados, se han probado distintas propuestas de reparto de cargas entre las fases concluyendo que, dada la disposición de los conductores en la red aérea, los errores pueden ser compensados a pesar de existir desequilibrios notables en las fases.

Otro objetivo del trabajo era la implementación de un sistema SCADA que permitiese la monitorización, supervisión y control de las distintas redes ubicadas en los laboratorios del Departamento de Ingeniería Eléctrica. Por ello, se han definido qué sistemas se deberían poder operar con esta herramienta, así como los ensayos que deberían poder realizarse.

Como primer acercamiento a un sistema de supervisión que pudiera contemplar el control de todos los sistemas descritos, se ha diseñado y desarrollado un SCADA para la red a escala residencial de BT ya

instalada en los laboratorios. Se han cubierto las principales funcionalidades descritas y se han analizado sobre la aplicación implantada.

Por todo ello, las contribuciones del trabajo realizado son las siguientes:

- Modelado de una red de distribución de tipo comercial, lo cual permite la implementación práctica en el laboratorio de forma flexible y con una optimización de los recursos disponibles.
- Desarrollo de un sistema SCADA que permite la realización de ensayos de forma manual o automatizados, de manera remota y minimizando la intervención humana.

A la vista del trabajo realizado, este Trabajo Fin de Máster permitirá el desarrollo de los siguientes trabajos futuros:

- Montaje físico de la red comercial de BT modelada.
- Realización de ensayos experimentales que permitan el estudio y validación de los resultados obtenidos en el presente trabajo.
- Ampliación de la primera versión de sistema SCADA que permita abarcar todos los sistemas instalados en los laboratorios y sus futuras ampliaciones con las mismas funcionalidades definidas.
- Implementación de un control en el SCADA que permita la gestión óptima de los recursos disponibles con el fin de acercarse a un ADMS.

ANEXO I

En este apartado se van a recoger los resultados de las simulaciones de los acoplamientos para las distintas simplificaciones y escenarios que se indican en el Capítulo 3 del presente trabajo.

Primera simplificación

- Escenario equilibrado

Nudo	Error máximo (V)						
	Fase A	Fase B	Fase C	Fase N	Fase A-N	Fase B-N	Fase C-N
1	0	0	0	0	0	0	0
2	0,0228	0,0227	0,0017	0	0,0228	0,0227	0,0017
3	0,1156	0,0991	0,0454	0,2887	0,5250	1,0263	0,5632
4	0,1600	0,1341	0,0739	0,4345	0,7812	1,5409	0,8595
5	0,2055	0,1429	0,1124	0,5507	1,0024	1,9462	1,1188
6	0,1688	0,1868	0,0788	0,5707	1,0004	2,0729	1,1334
7	0,0364	0,3111	0,0819	0,2153	1,5896	2,6147	0,6455
8	0,0730	0,4085	0,1375	0,6006	2,0663	3,3199	0,6870
9	0,1885	0,1970	0,1023	0,1550	1,9068	2,8799	1,0869
10	0,1433	0,2396	0,0660	0,5874	1,0205	2,2104	1,1600
11	0,1887	0,1766	0,1036	0,5618	1,0155	2,0357	1,1361
12	0,1663	0,2829	0,0888	0,2333	1,9493	3,0796	1,1232
13	0,0913	0,4952	0,1541	0,4881	2,1061	3,5102	0,7163
14	0,0595	0,4075	0,1066	0,1375	1,6301	2,8412	0,6812

Nudo	Error medio (V)						
	Fase A	Fase B	Fase C	Fase N	Fase A-N	Fase B-N	Fase C-N
1	0	0	0	0	0	0	0
2	0,0096	0,0094	0,0008	0	0,0096	0,0094	0,0008
3	0,0526	0,0370	0,0229	0,1608	0,2937	0,5853	0,3302
4	0,0733	0,0493	0,0370	0,2421	0,4388	0,8808	0,5031
5	0,0967	0,0508	0,0575	0,3077	0,5658	1,1146	0,6547
6	0,0742	0,0734	0,0368	0,3190	0,5637	1,1885	0,6625
7	0,0254	0,1517	0,0576	0,1712	0,9236	1,5219	0,3721
8	0,0590	0,2040	0,0929	0,4159	1,2045	1,9369	0,3927
9	0,0845	0,0756	0,0487	0,0547	1,1012	1,6661	0,6314
10	0,0579	0,1008	0,0262	0,3290	0,5720	1,2649	0,6765
11	0,0860	0,0661	0,0503	0,3144	0,5712	1,1646	0,6638
12	0,0676	0,1186	0,0360	0,0855	1,1186	1,7745	0,6502
13	0,0738	0,2470	0,1065	0,3567	1,2209	2,0399	0,4083
14	0,0468	0,2006	0,0763	0,1117	0,9405	1,6465	0,3912

- Escenario con desequilibrio medio

Nudo	Error máximo (V)						
	Fase A	Fase B	Fase C	Fase N	Fase A-N	Fase B-N	Fase C-N
1	0	0	0	0	0	0	0
2	0,0343	0,0155	0,0010	0	0,0343	0,0155	0,0010
3	0,1817	0,0608	0,0201	0,1817	0,3950	0,7450	0,4762
4	0,2579	0,0801	0,0321	0,2776	0,5806	1,1136	0,7107
5	0,3337	0,0811	0,0515	0,3548	0,7473	1,3901	0,8962
6	0,2644	0,1126	0,0322	0,3239	0,6522	1,4824	0,9626
7	0,0840	0,2185	0,0592	0,8120	1,0742	2,0166	0,5585
8	0,1624	0,2903	0,0940	1,0634	1,3886	2,5832	0,5861
9	0,3134	0,1174	0,0401	1,0321	1,6086	2,1601	0,6874
10	0,2136	0,1478	0,0225	0,2348	0,6102	1,5630	1,0030
11	0,3026	0,1042	0,0447	0,2969	0,7227	1,4462	0,9234
12	0,2759	0,1758	0,0266	0,9440	1,6146	2,2959	0,7174
13	0,2036	0,3506	0,1067	0,9702	1,3798	2,7130	0,6146
14	0,1364	0,2866	0,0763	0,6835	1,0378	2,1720	0,6094

Nudo	Error medio (V)						
	Fase A	Fase B	Fase C	Fase N	Fase A-N	Fase B-N	Fase C-N
1	0	0	0	0	0	0	0
2	0,0127	0,0067	0,0002	0	0,0127	0,0067	0,0002
3	0,0743	0,0230	0,0124	0,0635	0,1736	0,4238	0,3091
4	0,1053	0,0299	0,0194	0,0966	0,2554	0,6350	0,4647
5	0,1411	0,0294	0,0306	0,1263	0,3363	0,7958	0,5890
6	0,1012	0,0454	0,0187	0,1071	0,2824	0,8521	0,6284
7	0,0636	0,1127	0,0367	0,4063	0,5770	1,1982	0,3873
8	0,1235	0,1534	0,0582	0,5374	0,7610	1,5423	0,4186
9	0,1224	0,0458	0,0235	0,5047	0,8373	1,2679	0,4951
10	0,0706	0,0651	0,0119	0,0704	0,2520	0,9023	0,6578
11	0,1218	0,0394	0,0260	0,0935	0,3174	0,8300	0,6086
12	0,0924	0,0770	0,0144	0,4366	0,8190	1,3455	0,5240
13	0,1535	0,1851	0,0669	0,4706	0,7406	1,6168	0,4459
14	0,1046	0,1493	0,0482	0,3185	0,5418	1,2887	0,4278

- Escenario con desequilibrio extremo

Nudo	Errores máximos (V)						
	Fase A	Fase B	Fase C	Fase N	Fase A-N	Fase B-N	Fase C-N
1	0	0	0	0	0	0	0
2	0,0929	0,0018	0,0122	0	0,0929	0,0018	0,0122
3	0,5109	0,0113	0,0261	1,0463	1,5176	0,7706	0,3698
4	0,8108	0,0172	0,0387	1,6639	2,4064	1,2353	0,6521
5	1,0759	0,0210	0,0351	2,1801	3,1666	1,6186	0,9212
6	1,0112	0,0245	0,0723	2,2007	3,0974	1,6688	0,9347
7	0,2271	0,0423	0,1626	1,2547	1,4009	1,0451	0,5082
8	0,1834	0,0558	0,2230	1,3356	1,3437	1,1630	0,5729
9	1,1032	0,0265	0,0585	2,2925	3,3426	1,6520	1,0878
10	1,0570	0,0350	0,1054	2,2975	3,2610	1,7344	1,0859
11	1,1015	0,0280	0,0567	2,2427	3,2637	1,6621	1,0136
12	1,2056	0,0407	0,1043	2,4680	3,6393	1,7785	1,3165
13	0,2352	0,0672	0,2598	1,3599	1,3454	1,2097	0,6528
14	0,1802	0,0566	0,2086	1,2942	1,4091	1,1107	0,6035

Nudo	Errores medios (V)						
	Fase A	Fase B	Fase C	Fase N	Fase A-N	Fase B-N	Fase C-N
1	0	0	0	0	0	0	0
2	0,0209	0,0008	0,0040	0	0,0209	0,0008	0,0040
3	0,1302	0,0036	0,0059	0,5067	0,6082	0,3921	0,1205
4	0,2041	0,0054	0,0088	0,7837	0,9409	0,6095	0,2051
5	0,2827	0,0062	0,0110	1,0248	1,2470	0,7951	0,2875
6	0,2381	0,0086	0,0165	1,0319	1,1974	0,8170	0,2926
7	0,0579	0,0236	0,0810	0,6478	0,5390	0,5705	0,1765
8	0,1257	0,0324	0,1164	0,7041	0,5062	0,6481	0,2028
9	0,2597	0,0087	0,0122	1,0743	1,2750	0,8304	0,3260
10	0,2244	0,0143	0,0312	1,0578	1,2089	0,8445	0,3305
11	0,2738	0,0094	0,0122	1,0437	1,2549	0,8140	0,3120
12	0,2463	0,0164	0,0289	1,1106	1,2999	0,8718	0,3801
13	0,1634	0,0391	0,1369	0,7081	0,4769	0,6725	0,2275
14	0,0981	0,0319	0,1068	0,6576	0,5059	0,6039	0,2063

Segunda simplificación

- Escenario equilibrado

Nudo	Errores máximos (V)						
	Fase A	Fase B	Fase C	Fase N	Fase A-N	Fase B-N	Fase C-N
1	0	0	0	0	0	0	0
2	0,1135	0,0314	0,1080	0	0,1135	0,0314	0,1080
3	0,4945	0,2204	0,4424	0,7350	1,1752	0,9663	0,3780
4	0,6993	0,3206	0,6166	1,1128	1,7310	1,4502	0,5206
5	0,8860	0,3896	0,7481	1,4211	2,2050	1,8321	0,6274
6	0,8789	0,4471	0,8176	1,4821	2,2550	1,9533	0,6906
7	0,4001	0,4187	0,7167	0,8870	1,2551	1,3904	0,5947
8	0,3585	0,5072	0,8384	0,9566	1,2941	1,5808	0,6915
9	0,7644	0,3778	0,7376	1,2648	1,9712	1,7212	0,5946
10	0,8697	0,5013	0,8497	1,5223	2,3088	2,0923	0,7012
11	0,8795	0,4241	0,7691	1,4472	2,2391	1,9224	0,6334
12	0,7487	0,4478	0,7800	1,3302	2,0509	1,9146	0,6086
13	0,3351	0,5694	0,8802	1,0189	1,3589	1,7605	0,7034
14	0,3702	0,4943	0,7680	0,9557	1,3258	1,6079	0,6042

Nudo	Error medio (V)						
	Fase A	Fase B	Fase C	Fase N	Fase A-N	Fase B-N	Fase C-N
1	0	0	0	0	0	0	0
2	0,0646	0,0157	0,0632	0	0,0646	0,0157	0,0632
3	0,2790	0,1158	0,2583	0,4209	0,6685	0,5467	0,2172
4	0,3930	0,1684	0,3595	0,6371	0,9829	0,8208	0,2979
5	0,4974	0,2036	0,4356	0,8144	1,2522	1,0376	0,3575
6	0,4917	0,2367	0,4766	0,8495	1,2793	1,1076	0,3945
7	0,2178	0,2276	0,4186	0,5023	0,7009	0,7879	0,3391
8	0,1908	0,2774	0,4896	0,5392	0,7167	0,8957	0,3934
9	0,4245	0,1949	0,4288	0,7177	1,1070	0,9691	0,3345
10	0,4821	0,2646	0,4953	0,8698	1,3017	1,1848	0,3960
11	0,4908	0,2216	0,4479	0,8278	1,2665	1,0882	0,3581
12	0,4101	0,2310	0,4535	0,7495	1,1403	1,0754	0,3365
13	0,1738	0,3099	0,5137	0,5696	0,7441	0,9949	0,3950
14	0,1962	0,2675	0,4484	0,5366	0,7309	0,9094	0,3388

- Escenario con desequilibrio medio

Nudo	Errores máximos (V)						
	Fase A	Fase B	Fase C	Fase N	Fase A-N	Fase B-N	Fase C-N
1	0	0	0	0	0	0	0
2	0,1743	0,1593	0,1630	0	0,1743	0,1593	0,1630
3	0,9214	0,7944	0,5772	0,7843	1,7418	1,8016	0,4125
4	1,3469	1,1348	0,7950	1,2269	2,6274	2,6944	0,5697
5	1,7322	1,4052	0,9660	1,6080	3,4106	3,4189	0,7215
6	1,7301	1,4950	1,0244	1,6428	3,4494	3,6074	0,7273
7	0,7724	1,0172	0,6827	0,6908	1,6455	2,2575	0,2878
8	0,7057	1,1162	0,7289	0,6562	1,6060	2,4597	0,2252
9	1,5246	1,2503	0,8098	1,3431	3,0532	3,0497	0,5480
10	1,7476	1,5521	1,0424	1,6246	3,5576	3,7476	0,7528
11	1,7415	1,4420	0,9781	1,5918	3,4755	3,5105	0,7343
12	1,5404	1,3214	0,8329	1,3450	3,1815	3,2409	0,5598
13	0,6748	1,1748	0,7489	0,6228	1,6342	2,6101	0,1949
14	0,7352	1,0893	0,7084	0,6383	1,6758	2,4449	0,2496

Nudo	Error medio (V)						
	Fase A	Fase B	Fase C	Fase N	Fase A-N	Fase B-N	Fase C-N
1	0	0	0	0	0	0	0
2	0,0899	0,0838	0,0916	0	0,0899	0,0838	0,0916
3	0,4741	0,4181	0,3259	0,3849	0,8936	0,9590	0,2118
4	0,6856	0,5949	0,4480	0,5956	1,3336	1,4257	0,2829
5	0,8789	0,7346	0,5441	0,7787	1,7252	1,8041	0,3506
6	0,8729	0,7844	0,5780	0,7923	1,7381	1,9068	0,3520
7	0,3761	0,5424	0,4021	0,3094	0,8084	1,2154	0,1473
8	0,3324	0,5975	0,4356	0,2796	0,7719	1,3290	0,1157
9	0,7555	0,6498	0,4702	0,6206	1,5054	1,6038	0,2628
10	0,8659	0,8125	0,5884	0,7611	1,7599	1,9795	0,3452
11	0,8738	0,7528	0,5511	0,7568	1,7379	1,8520	0,3449
12	0,7427	0,6850	0,4837	0,5923	1,5278	1,7012	0,2454
13	0,3055	0,6276	0,4478	0,2445	0,7634	1,4107	0,0862
14	0,3432	0,5796	0,4177	0,2604	0,7959	1,3176	0,1104

- Escenario con desequilibrio extremo

Nudo	Errores máximos (V)						
	Fase A	Fase B	Fase C	Fase N	Fase A-N	Fase B-N	Fase C-N
1	0	0	0	0	0	0	0
2	0,2890	0,2228	0,2409	0	0,2890	0,2228	0,2409
3	1,6958	1,1594	0,8422	2,0703	3,5690	2,8168	1,1988
4	2,5971	1,6672	1,1672	3,2974	5,5688	4,2897	1,8741
5	3,3490	2,0718	1,4143	4,2958	7,2082	5,4620	2,4870
6	3,3945	2,1629	1,5028	4,4237	7,3373	5,6845	2,5776
7	1,6448	1,2999	0,9970	2,2077	3,6697	3,0963	1,4034
8	1,6252	1,3629	1,0649	2,2711	3,7207	3,2223	1,4905
9	3,2714	1,7948	1,2104	4,0150	7,0634	4,7859	2,5235
10	3,6056	2,1831	1,5507	4,6165	7,8642	5,7274	2,9743
11	3,4661	2,0851	1,4445	4,4060	7,5066	5,4877	2,7209
12	3,6076	1,8195	1,2743	4,3817	7,8597	4,9360	3,0457
13	1,7023	1,3808	1,1122	2,3976	3,9745	3,2794	1,7132
14	1,7308	1,3226	1,0560	2,3556	3,9625	3,1680	1,6684

Nudo	Error medio (V)						
	Fase A	Fase B	Fase C	Fase N	Fase A-N	Fase B-N	Fase C-N
1	0	0	0	0	0	0	0
2	0,0744	0,1030	0,1203	0	0,0744	0,1030	0,1203
3	0,5093	0,5532	0,4254	0,8614	1,2386	1,3093	0,4361
4	0,7690	0,7909	0,5857	1,3351	1,8950	1,9560	0,6395
5	1,0027	0,9837	0,7093	1,7373	2,4656	2,4878	0,8260
6	0,9931	1,0284	0,7573	1,7794	2,4753	2,5844	0,8535
7	0,3896	0,6263	0,5187	0,8661	1,1199	1,4345	0,4800
8	0,3363	0,6588	0,5597	0,8671	1,0666	1,4893	0,4961
9	0,9008	0,8472	0,6048	1,5219	2,2405	2,1367	0,7735
10	1,0086	1,0374	0,7782	1,8056	2,5535	2,5974	0,9443
11	1,0108	0,9896	0,7228	1,7542	2,5120	2,4972	0,8821
12	0,9225	0,8582	0,6321	1,5738	2,3450	2,1689	0,8815
13	0,3152	0,6674	0,5828	0,8816	1,0796	1,5080	0,5467
14	0,3643	0,6372	0,5478	0,8853	1,1376	1,4603	0,5438

Tercera simplificación

- Escenario equilibrado

Nudo	Errores máximos (V)						
	Fase A	Fase B	Fase C	Fase N	Fase A-N	Fase B-N	Fase C-N
1	0	0	0	0	0	0	0
2	0,1558	0,0228	0,1515	0	0,1558	0,0228	0,1515
3	0,7018	0,2181	0,6602	0,9059	1,5515	0,9640	0,7649
4	0,9929	0,3216	0,9252	1,3730	2,2816	1,4509	1,0866
5	1,2509	0,3931	1,1311	1,7548	2,8992	1,8349	1,3407
6	1,2590	0,4515	1,2166	1,8315	2,9796	1,9562	1,4359
7	0,6978	0,4395	1,0326	1,1547	1,7975	1,3752	1,1916
8	0,6964	0,5385	1,1980	1,2680	1,9103	1,5599	1,3819
9	1,1441	0,4002	1,1389	1,6163	2,6803	1,7101	1,3591
10	1,2967	0,5209	1,2989	1,9216	3,1160	2,0849	1,5579
11	1,2748	0,4376	1,1848	1,8132	2,9870	1,9183	1,4194
12	1,1916	0,4905	1,2498	1,7508	2,8722	1,8910	1,5235
13	0,7300	0,6192	1,3023	1,3940	2,0769	1,7285	1,5306
14	0,7388	0,5380	1,1616	1,3025	1,9946	1,5784	1,3715

Nudo	Error medio (V)						
	Fase A	Fase B	Fase C	Fase N	Fase A-N	Fase B-N	Fase C-N
1	0	0	0	0	0	0	0
2	0,0890	0,0107	0,0877	0	0,0890	0,0107	0,0877
3	0,3975	0,1144	0,3810	0,5215	0,8820	0,5435	0,4367
4	0,5604	0,1689	0,5333	0,7900	1,2947	0,8184	0,6188
5	0,7053	0,2056	0,6513	1,0106	1,6451	1,0358	0,7620
6	0,7083	0,2392	0,7013	1,0549	1,6893	1,1058	0,8171
7	0,3874	0,2397	0,5969	0,6602	1,0079	0,7767	0,6782
8	0,3831	0,2955	0,6927	0,7229	1,0652	0,8810	0,7856
9	0,6401	0,2078	0,6545	0,9240	1,5069	0,9595	0,7671
10	0,7248	0,2758	0,7483	1,1045	1,7579	1,1771	0,8815
11	0,7159	0,2293	0,6822	1,0431	1,6896	1,0825	0,8039
12	0,6609	0,2555	0,7177	0,9962	1,6025	1,0584	0,8537
13	0,3982	0,3387	0,7521	0,7908	1,1497	0,9736	0,8648
14	0,4060	0,2929	0,6709	0,7413	1,1092	0,8897	0,7751

- Escenario con desequilibrio medio

Nudo	Errores máximos (V)						
	Fase A	Fase B	Fase C	Fase N	Fase A-N	Fase B-N	Fase C-N
1	0	0	0	0	0	0	0
2	0,2228	0,1983	0,2398	0	0,2228	0,1983	0,2398
3	1,2065	1,0379	0,9167	1,0417	2,2947	2,2446	0,8243
4	1,7579	1,4875	1,2719	1,6222	3,4497	3,3533	1,1621
5	2,2450	1,8472	1,5552	2,1150	4,4517	4,2525	1,4643
6	2,2655	1,9567	1,6372	2,1740	4,5387	4,4788	1,5030
7	1,2085	1,3961	1,1488	1,0901	2,5110	2,9150	0,9124
8	1,2101	1,5562	1,2516	1,1207	2,6130	3,2151	0,9452
9	2,0876	1,7370	1,4084	1,8830	4,1924	3,9256	1,3493
10	2,3680	2,0900	1,7168	2,2322	4,8234	4,7320	1,6469
11	2,3083	1,9328	1,6070	2,1464	4,6283	4,4154	1,5532
12	2,2209	1,9121	1,5170	1,9943	4,5637	4,2773	1,5212
13	1,2808	1,7061	1,3491	1,1823	2,8499	3,5055	1,0557
14	1,2948	1,5803	1,2705	1,1518	2,7946	3,2714	1,0477

Nudo	Error medio (V)						
	Fase A	Fase B	Fase C	Fase N	Fase A-N	Fase B-N	Fase C-N
1	0	0	0	0	0	0	0
2	0,1144	0,1037	0,1340	0	0,1144	0,1037	0,1340
3	0,6194	0,5446	0,5137	0,5144	1,1750	1,1842	0,4384
4	0,8943	0,7777	0,7115	0,7935	1,7503	1,7591	0,6070
5	1,1393	0,9636	0,8697	1,0324	2,2528	2,2260	0,7558
6	1,1447	1,0236	0,9166	1,0581	2,2899	2,3476	0,7749
7	0,6000	0,7411	0,6608	0,5115	1,2509	1,5509	0,4902
8	0,5915	0,8285	0,7257	0,5148	1,2866	1,7142	0,5104
9	1,0401	0,9019	0,8005	0,8890	2,0785	2,0448	0,6976
10	1,1809	1,0914	0,9615	1,0649	2,3998	2,4774	0,8309
11	1,1622	1,0076	0,8992	1,0347	2,3223	2,3106	0,7911
12	1,0858	0,9910	0,8611	0,9142	2,2205	2,2215	0,7647
13	0,6171	0,9070	0,7812	0,5278	1,3845	1,8670	0,5572
14	0,6318	0,8383	0,7303	0,5215	1,3696	1,7401	0,5483

- Escenario con desequilibrio extremo

Nudo	Errores máximos (V)						
	Fase A	Fase B	Fase C	Fase N	Fase A-N	Fase B-N	Fase C-N
1	0	0	0	0	0	0	0
2	0,2976	0,2730	0,3484	0,0000	0,2976	0,2730	0,3484
3	1,8244	1,4918	1,3112	2,2347	3,7982	3,3487	1,5700
4	2,7946	2,1554	1,8285	3,5532	5,9167	5,0775	2,3911
5	3,5964	2,6846	2,2289	4,6189	7,6328	6,4474	3,1166
6	3,6540	2,8036	2,3501	4,7618	7,7805	6,7134	3,2318
7	1,8776	1,8194	1,6358	2,4600	4,0846	3,9181	1,9110
8	1,9074	1,9673	1,7801	2,5646	4,2241	4,1745	2,0605
9	3,5940	2,4828	2,0433	4,3757	7,6398	5,8760	3,1981
10	3,9333	2,9331	2,4791	5,0013	8,4308	6,9131	3,7017
11	3,7547	2,7663	2,3110	4,7572	8,0043	6,5725	3,3942
12	4,0351	2,6631	2,2268	4,8220	8,6325	6,2558	3,8341
13	2,0643	2,1133	1,9317	2,7514	4,6240	4,4238	2,3710
14	2,0555	1,9962	1,8221	2,6767	4,5425	4,2235	2,2774

Nudo	Error medio (V)						
	Fase A	Fase B	Fase C	Fase N	Fase A-N	Fase B-N	Fase C-N
1	0	0	0	0	0	0	0
2	0,0694	0,1234	0,1734	0	0,0694	0,1234	0,1734
3	0,5327	0,7008	0,6607	0,9164	1,2743	1,5473	0,5932
4	0,8077	1,0065	0,9160	1,4189	1,9500	2,3062	0,8515
5	1,0529	1,2545	1,1169	1,8435	2,5315	2,9273	1,0814
6	1,0462	1,3116	1,1813	1,8905	2,5443	3,0436	1,1182
7	0,4524	0,8650	0,8426	0,9523	1,2192	1,8179	0,6905
8	0,4173	0,9384	0,9230	0,9677	1,1954	1,9372	0,7305
9	0,9797	1,1522	1,0194	1,6369	2,3610	2,6255	1,0397
10	1,0867	1,3717	1,2445	1,9319	2,6631	3,1337	1,2355
11	1,0767	1,2934	1,1580	1,8702	2,6032	2,9871	1,1541
12	1,0370	1,2336	1,1061	1,7125	2,5256	2,7645	1,1863
13	0,4268	1,0091	1,0003	1,0031	1,2595	2,0520	0,8143
14	0,4640	0,9523	0,9390	0,9967	1,2975	1,9634	0,7942

Convertidores adicionales – nudos 3, 4, 5 y 6

- Escenario equilibrado

Nudo	Errores máximos (V)						
	Fase A	Fase B	Fase C	Fase N	Fase A-N	Fase B-N	Fase C-N
1	0	0	0	0	0	0	0
2	0,0122	0,0003	0,2937	0	0,0122	0,0003	0,2937
3	0,0792	0,0125	0,9114	0,5683	0,3460	0,5785	1,0377
4	0,1057	0,0222	1,1125	0,5873	0,3611	0,5844	1,1841
5	0,1305	0,0462	1,1037	0,2501	0,1399	0,1989	0,9745
6	0,0896	0,0094	1,1440	0,1870	0,1409	0,0877	0,9709
7	0,0445	0,1505	1,2060	0,3278	0,2891	0,1871	1,2789
8	0,0991	0,2232	1,3369	0,2204	0,2606	0,0423	1,3867
9	0,1324	0,0084	1,2537	0,3588	0,1664	0,3540	1,2795
10	0,0569	0,0202	1,1846	0,1280	0,1256	0,0388	0,9851
11	0,1090	0,0277	1,1307	0,2001	0,1291	0,1256	0,9838
12	0,0897	0,0285	1,3136	0,2362	0,1368	0,1915	1,3100
13	0,1403	0,2622	1,3933	0,1252	0,2144	0,1463	1,4148
14	0,0966	0,1971	1,2756	0,1874	0,2369	0,0347	1,3087

Nudo	Error medio (V)						
	Fase A	Fase B	Fase C	Fase N	Fase A-N	Fase B-N	Fase C-N
1	0	0	0	0	0	0	0
2	0,0074	0,0003	0,1762	0	0,0074	0,0003	0,1762
3	0,0477	0,0081	0,5397	0,3600	0,2265	0,3610	0,6120
4	0,0634	0,0140	0,6566	0,3806	0,2450	0,3707	0,6944
5	0,0782	0,0285	0,6485	0,1850	0,1130	0,1440	0,5634
6	0,0538	0,0065	0,6720	0,1473	0,1141	0,0717	0,5601
7	0,0257	0,0889	0,7087	0,2263	0,2027	0,1327	0,7446
8	0,0581	0,1320	0,7836	0,1670	0,1907	0,0307	0,8036
9	0,0791	0,0055	0,7345	0,2546	0,1342	0,2384	0,7404
10	0,0344	0,0110	0,6943	0,1053	0,1023	0,0186	0,5635
11	0,0654	0,0173	0,6634	0,1564	0,1052	0,0994	0,5656
12	0,0535	0,0167	0,7666	0,1869	0,1109	0,1443	0,7498
13	0,0825	0,1548	0,8139	0,1028	0,1689	0,0599	0,8123
14	0,0565	0,1166	0,7463	0,1482	0,1795	0,0219	0,7531

- Escenario con desequilibrio medio

Nudo	Errores máximos (V)						
	Fase A	Fase B	Fase C	Fase N	Fase A-N	Fase B-N	Fase C-N
1	0	0	0	0	0	0	0
2	0,0059	0,0173	0,2305	0	0,0059	0,0173	0,2305
3	0,0471	0,0703	0,6437	0,7438	0,7252	0,5110	0,3963
4	0,0630	0,0828	0,7707	0,9598	0,9390	0,5641	0,3403
5	0,0825	0,0628	0,7580	0,9055	0,8693	0,3237	0,1779
6	0,0471	0,0897	0,7788	0,9407	0,9858	0,2392	0,1399
7	0,2536	0,2458	0,7499	0,8198	1,0728	0,1529	0,2616
8	0,3758	0,3238	0,7963	0,8716	1,2272	0,0137	0,2194
9	0,0817	0,1384	0,7836	0,8966	0,8755	0,3447	0,2676
10	0,1317	0,1089	0,7955	0,9880	1,0983	0,1738	0,1443
11	0,0570	0,0753	0,7696	0,9290	0,9364	0,2766	0,1544
12	0,0874	0,1637	0,8068	0,9425	1,0171	0,2492	0,2160
13	0,4853	0,3513	0,8177	0,9286	1,3649	0,0921	0,1738
14	0,3833	0,2794	0,7777	0,8808	1,2384	0,0388	0,1961

Nudo	Error medio (V)						
	Fase A	Fase B	Fase C	Fase N	Fase A-N	Fase B-N	Fase C-N
1	0	0	0	0	0	0	0
2	0,0026	0,0092	0,1457	0	0,0026	0,0092	0,1457
3	0,0346	0,0371	0,4170	0,4290	0,3988	0,3244	0,3055
4	0,0460	0,0433	0,5015	0,5538	0,5127	0,3596	0,2714
5	0,0614	0,0311	0,4940	0,5238	0,4619	0,2103	0,1237
6	0,0243	0,0482	0,5068	0,5424	0,5224	0,1565	0,0824
7	0,1041	0,1425	0,4945	0,4574	0,5679	0,1029	0,2024
8	0,1663	0,1892	0,5286	0,4813	0,6425	0,0079	0,1532
9	0,0592	0,0743	0,5241	0,5087	0,4583	0,2289	0,1966
10	0,0372	0,0610	0,5173	0,5629	0,5744	0,1114	0,0729
11	0,0361	0,0395	0,5012	0,5338	0,4941	0,1792	0,0969
12	0,0303	0,0913	0,5388	0,5270	0,5237	0,1649	0,1376
13	0,2191	0,2069	0,5421	0,5074	0,7060	0,0544	0,1019
14	0,1681	0,1643	0,5118	0,4847	0,6464	0,0270	0,1340

- Escenario con desequilibrio extremo

Nudo	Errores máximos (V)						
	Fase A	Fase B	Fase C	Fase N	Fase A-N	Fase B-N	Fase C-N
1	0	0	0	0	0	0	0
2	0,0652	0,0253	0,0754	0	0,0652	0,0253	0,0754
3	0,4076	0,1477	0,2014	0,7200	1,0905	0,6791	0,3873
4	0,6571	0,1940	0,2478	1,2166	1,8045	1,1007	0,6010
5	0,8786	0,1973	0,2423	1,7010	2,4867	1,4611	0,8185
6	0,8041	0,2007	0,2791	1,7142	2,3999	1,5062	0,8203
7	0,1189	0,2767	0,3351	0,6825	0,7126	0,9134	0,3078
8	0,1761	0,3346	0,3933	0,6522	0,5359	1,0121	0,2608
9	0,9278	0,3064	0,2604	1,6212	2,4755	1,5086	0,7807
10	0,8198	0,2105	0,3116	1,7874	2,5067	1,5612	0,9310
11	0,8872	0,2039	0,2636	1,7509	2,5525	1,4991	0,8872
12	0,9704	0,3194	0,3032	1,7448	2,6618	1,6036	0,9326
13	0,2476	0,3449	0,4275	0,6441	0,4632	1,0369	0,2808
14	0,1555	0,2899	0,3791	0,6909	0,6473	0,9587	0,3426

Nudo	Error medio (V)						
	Fase A	Fase B	Fase C	Fase N	Fase A-N	Fase B-N	Fase C-N
1	0	0	0	0	0	0	0
2	0,0135	0,0111	0,0479	0	0,0135	0,0111	0,0479
3	0,1134	0,0670	0,1319	0,3256	0,4280	0,3061	0,2148
4	0,1793	0,0866	0,1594	0,5440	0,6988	0,4930	0,2998
5	0,2484	0,0868	0,1516	0,7816	0,9911	0,6759	0,3684
6	0,2018	0,0897	0,1729	0,7879	0,9384	0,6972	0,3705
7	0,0540	0,1362	0,2209	0,3203	0,2223	0,4341	0,1937
8	0,1235	0,1670	0,2598	0,3113	0,1285	0,4892	0,1799
9	0,2449	0,1379	0,1724	0,7063	0,9099	0,6765	0,3376
10	0,1821	0,0952	0,1906	0,8121	0,9403	0,7234	0,3989
11	0,2359	0,0904	0,1634	0,7997	0,9935	0,6941	0,3871
12	0,2192	0,1451	0,1958	0,7376	0,9153	0,7138	0,3718
13	0,1730	0,1731	0,2804	0,3120	0,0835	0,5102	0,1863
14	0,1081	0,1440	0,2471	0,3276	0,1738	0,4644	0,2051

Convertidores adicionales – nudos 3, 4, 6 y 7

- Escenario equilibrado

Nudo	Errores máximos (V)						
	Fase A	Fase B	Fase C	Fase N	Fase A-N	Fase B-N	Fase C-N
1	0	0	0	0	0	0	0
2	0,0266	0,0089	0,1966	0	0,0266	0,0089	0,1966
3	0,1374	0,0413	0,6122	0,0676	0,0602	0,0202	0,5530
4	0,2071	0,0593	0,8466	0,0992	0,1044	0,0358	0,7795
5	0,2903	0,0693	0,8906	0,2266	0,4234	0,3916	0,6914
6	0,2514	0,1081	0,9301	0,2859	0,4248	0,5156	0,6863
7	0,0126	0,2222	0,8299	0,7407	0,6839	1,0684	0,6497
8	0,0383	0,3073	0,9525	0,8109	0,7117	1,2511	0,7459
9	0,2417	0,0854	0,9776	0,1207	0,3126	0,2538	0,8608
10	0,2238	0,1445	0,9661	0,3545	0,4557	0,6380	0,6953
11	0,2722	0,0923	0,9147	0,2735	0,4438	0,4715	0,6973
12	0,2043	0,1314	1,0293	0,2342	0,3684	0,4252	0,8803
13	0,0665	0,3644	0,9957	0,8740	0,7600	1,4199	0,7562
14	0,0336	0,2915	0,8830	0,8117	0,7341	1,2725	0,6573

Nudo	Error medio (V)						
	Fase A	Fase B	Fase C	Fase N	Fase A-N	Fase B-N	Fase C-N
1	0	0	0	0	0	0	0
2	0,0145	0,0039	0,1174	0	0,0145	0,0039	0,1174
3	0,0759	0,0171	0,3616	0,0543	0,0208	0,0124	0,3232
4	0,1156	0,0257	0,4993	0,0801	0,0361	0,0210	0,4548
5	0,1635	0,0298	0,5235	0,1049	0,2132	0,2004	0,3980
6	0,1400	0,0526	0,5466	0,1392	0,2126	0,2734	0,3941
7	0,0054	0,1200	0,4882	0,4202	0,3787	0,6121	0,3736
8	0,0303	0,1684	0,5596	0,4581	0,3900	0,7168	0,4278
9	0,1345	0,0393	0,5728	0,0427	0,1417	0,1162	0,4948
10	0,1228	0,0730	0,5670	0,1770	0,2260	0,3439	0,3952
11	0,1521	0,0428	0,5371	0,1308	0,2220	0,2468	0,3987
12	0,1112	0,0654	0,6016	0,0980	0,1657	0,2138	0,4994
13	0,0505	0,1989	0,5843	0,4901	0,4108	0,8117	0,4288
14	0,0267	0,1574	0,5188	0,4570	0,4005	0,7282	0,3727

- Escenario con desequilibrio medio

Nudo	Errores máximos (V)						
	Fase A	Fase B	Fase C	Fase N	Fase A-N	Fase B-N	Fase C-N
1	0	0	0	0	0	0	0
2	0,0274	0,0335	0,1610	0	0,0274	0,0335	0,1610
3	0,1746	0,1525	0,4560	0,3052	0,1297	0,0971	0,1653
4	0,2783	0,2415	0,6300	0,4336	0,1583	0,1677	0,1944
5	0,4166	0,3280	0,6868	0,2741	0,1513	0,5729	0,1169
6	0,3422	0,3573	0,7078	0,3035	0,0501	0,6645	0,0793
7	0,0767	0,3148	0,5526	0,0550	0,0913	0,9672	0,0632
8	0,1760	0,4026	0,5977	0,0285	0,0190	1,1393	0,0791
9	0,3202	0,3102	0,6414	0,3689	0,0557	0,4143	0,1381
10	0,2816	0,3853	0,7240	0,3480	0,0558	0,7463	0,0807
11	0,3796	0,3462	0,6980	0,2981	0,1154	0,6300	0,0950
12	0,2369	0,3455	0,6632	0,4112	0,1110	0,5288	0,0972
13	0,2535	0,4445	0,6166	0,0776	0,0934	1,2484	0,1509
14	0,1689	0,3664	0,5770	0,0502	0,0038	1,1057	0,0777

Nudo	Error medio (V)						
	Fase A	Fase B	Fase C	Fase N	Fase A-N	Fase B-N	Fase C-N
1	0	0	0	0	0	0	0
2	0,0152	0,0172	0,1006	0	0,0152	0,0172	0,1006
3	0,0988	0,0775	0,2913	0,1946	0,0939	0,0319	0,1308
4	0,1578	0,1240	0,4025	0,2788	0,1184	0,0553	0,1567
5	0,2356	0,1689	0,4350	0,1966	0,0512	0,2781	0,0889
6	0,1940	0,1869	0,4477	0,2141	0,0193	0,3345	0,0477
7	0,0409	0,1726	0,3556	0,0187	0,0550	0,5555	0,0443
8	0,0952	0,2235	0,3888	0,0198	0,0049	0,6584	0,0332
9	0,1831	0,1603	0,4242	0,2451	0,0397	0,1876	0,0940
10	0,1607	0,2033	0,4578	0,2399	0,0397	0,3855	0,0392
11	0,2146	0,1796	0,4418	0,2112	0,0349	0,3129	0,0662
12	0,1378	0,1813	0,4379	0,2702	0,0870	0,2580	0,0578
13	0,1372	0,2472	0,4008	0,0628	0,0473	0,7256	0,0498
14	0,0919	0,2020	0,3709	0,0400	0,0018	0,6401	0,0274

- Escenario con desequilibrio extremo

Nudo	Errores máximos (V)						
	Fase A	Fase B	Fase C	Fase N	Fase A-N	Fase B-N	Fase C-N
1	0	0	0	0	0	0	0
2	0,1071	0,0423	0,0760	0	0,1071	0,0423	0,0760
3	0,6237	0,2288	0,2210	0,9918	1,5624	0,9645	0,4903
4	1,0128	0,3780	0,3311	1,6242	2,5325	1,6026	0,7997
5	1,3876	0,5335	0,4184	2,2613	3,4819	2,2599	1,1128
6	1,3273	0,5375	0,4565	2,2863	3,4223	2,3096	1,1309
7	0,3601	0,3054	0,3582	1,1123	1,3792	1,2288	0,5550
8	0,2540	0,3642	0,4185	1,1038	1,2527	1,3377	0,5402
9	1,3654	0,4929	0,3488	2,0953	3,3683	2,0347	1,0709
10	1,3848	0,5493	0,4916	2,3852	3,6182	2,3636	1,3017
11	1,4196	0,5414	0,4412	2,3238	3,5975	2,2958	1,2168
12	1,4677	0,5079	0,3950	2,2699	3,6767	2,1459	1,2951
13	0,2086	0,3758	0,4554	1,1271	1,2520	1,3761	0,6082
14	0,3116	0,3202	0,4053	1,1537	1,3921	1,2874	0,6444

Nudo	Error medio (V)						
	Fase A	Fase B	Fase C	Fase N	Fase A-N	Fase B-N	Fase C-N
1	0	0	0	0	0	0	0
2	0,0241	0,0190	0,0440	0	0,0241	0,0190	0,0440
3	0,1702	0,1061	0,1283	0,4403	0,5817	0,4461	0,2171
4	0,2785	0,1760	0,1897	0,7009	0,9248	0,7258	0,3308
5	0,4016	0,2508	0,2323	0,9947	1,3053	1,0440	0,4316
6	0,3576	0,2539	0,2539	1,0027	1,2574	1,0656	0,4373
7	0,0537	0,1485	0,2128	0,5190	0,4600	0,6030	0,2427
8	0,0759	0,1796	0,2521	0,5126	0,3753	0,6591	0,2371
9	0,3569	0,2281	0,2035	0,8687	1,1610	0,9102	0,3862
10	0,3453	0,2601	0,2720	1,0272	1,2750	1,0894	0,4785
11	0,3935	0,2549	0,2443	1,0123	1,3169	1,0605	0,4581
12	0,3404	0,2359	0,2273	0,9043	1,1849	0,9477	0,4339
13	0,1138	0,1862	0,2731	0,5167	0,3433	0,6813	0,2553
14	0,0668	0,1569	0,2394	0,5296	0,4261	0,6343	0,2682

Convertidores adicionales – nudos 3, 4, 5 y 7

- Escenario equilibrado

Nudo	Errores máximos (V)						
	Fase A	Fase B	Fase C	Fase N	Fase A-N	Fase B-N	Fase C-N
1	0	0	0	0	0	0	0
2	0,0326	0,0098	0,2034	0	0,0326	0,0098	0,2034
3	0,1629	0,0506	0,6425	0,0631	0,1019	0,0218	0,6103
4	0,2515	0,0770	0,8993	0,0921	0,1799	0,0397	0,8854
5	0,3620	0,0995	0,9756	0,2532	0,5471	0,3821	0,8678
6	0,3491	0,1524	1,0455	0,3209	0,5917	0,4984	0,9320
7	0,0391	0,2315	0,8615	0,7641	0,7280	1,0671	0,7095
8	0,0207	0,3166	0,9847	0,8357	0,7568	1,2498	0,8068
9	0,2879	0,1032	1,0325	0,1374	0,3923	0,2499	0,9708
10	0,3237	0,1890	1,0843	0,3966	0,6276	0,6214	0,9460
11	0,3449	0,1226	1,0009	0,3034	0,5698	0,4622	0,8762
12	0,2519	0,1494	1,0858	0,2549	0,4511	0,4215	0,9935
13	0,0442	0,3738	1,0287	0,9007	0,8066	1,4187	0,8188
14	0,0174	0,3009	0,9157	0,8376	0,7801	1,2712	0,7191

Nudo	Error medio (V)						
	Fase A	Fase B	Fase C	Fase N	Fase A-N	Fase B-N	Fase C-N
1	0	0	0	0	0	0	0
2	0,0180	0,0044	0,1213	0	0,0180	0,0044	0,1213
3	0,0904	0,0225	0,3787	0,0512	0,0375	0,0129	0,3559
4	0,1409	0,0362	0,5292	0,0749	0,0722	0,0245	0,5157
5	0,2046	0,0476	0,5719	0,1182	0,2828	0,1930	0,5000
6	0,1966	0,0787	0,6131	0,1573	0,3077	0,2611	0,5374
7	0,0138	0,1255	0,5058	0,4332	0,4028	0,6107	0,4074
8	0,0152	0,1739	0,5774	0,4719	0,4146	0,7154	0,4620
9	0,1606	0,0498	0,6036	0,0491	0,1856	0,1127	0,5573
10	0,1802	0,0993	0,6346	0,1989	0,3232	0,3319	0,5406
11	0,1937	0,0607	0,5861	0,1459	0,2926	0,2395	0,5018
12	0,1378	0,0759	0,6330	0,1079	0,2108	0,2103	0,5632
13	0,0351	0,2045	0,6024	0,5047	0,4361	0,8103	0,4637
14	0,0114	0,1630	0,5368	0,4714	0,4254	0,7268	0,4073

- Escenario con desequilibrio medio

Nudo	Errores máximos (V)						
	Fase A	Fase B	Fase C	Fase N	Fase A-N	Fase B-N	Fase C-N
1	0	0	0	0	0	0	0
2	0,0384	0,0431	0,1712	0	0,0384	0,0431	0,1712
3	0,2326	0,2015	0,4928	0,2588	0,0591	0,1730	0,2150
4	0,3787	0,3287	0,6929	0,3458	0,0504	0,3064	0,2719
5	0,5738	0,4707	0,7884	0,1621	0,4517	0,7996	0,2292
6	0,5490	0,5533	0,8453	0,1511	0,4463	0,9667	0,2217
7	0,0162	0,3655	0,5902	0,1063	0,2077	1,0481	0,0969
8	0,1100	0,4540	0,6356	0,0494	0,1028	1,2224	0,0636
9	0,4304	0,4001	0,7054	0,2739	0,1976	0,5618	0,1955
10	0,4983	0,5843	0,8626	0,1791	0,4066	1,0571	0,1810
11	0,5415	0,4904	0,8001	0,1788	0,4261	0,8606	0,2007
12	0,3544	0,4375	0,7279	0,3078	0,1300	0,6825	0,1469
13	0,1838	0,4970	0,6548	0,0506	0,0362	1,3347	0,0837
14	0,1011	0,4184	0,6151	0,0304	0,1256	1,1902	0,0442

Nudo	Error medio (V)						
	Fase A	Fase B	Fase C	Fase N	Fase A-N	Fase B-N	Fase C-N
1	0	0	0	0	0	0	0
2	0,0206	0,0221	0,1062	0	0,0206	0,0221	0,1062
3	0,1269	0,1027	0,3116	0,1725	0,0438	0,0602	0,1628
4	0,2070	0,1690	0,4373	0,2362	0,0293	0,1135	0,2143
5	0,3145	0,2430	0,4914	0,1256	0,2009	0,3865	0,1838
6	0,3007	0,2899	0,5248	0,1171	0,1990	0,4814	0,1790
7	0,0111	0,1984	0,3762	0,0393	0,1089	0,5930	0,0777
8	0,0646	0,2495	0,4096	0,0172	0,0508	0,6968	0,0389
9	0,2354	0,2063	0,4594	0,1992	0,0604	0,2563	0,1541
10	0,2708	0,3074	0,5354	0,1389	0,1709	0,5357	0,1474
11	0,2951	0,2543	0,4985	0,1384	0,1825	0,4228	0,1627
12	0,1924	0,2281	0,4734	0,2220	0,0382	0,3288	0,1054
13	0,1054	0,2737	0,4217	0,0372	0,0117	0,7650	0,0324
14	0,0607	0,2283	0,3917	0,0177	0,0586	0,6790	0,0267

- Escenario con desequilibrio extremo

Nudo	Errores máximos (V)						
	Fase A	Fase B	Fase C	Fase N	Fase A-N	Fase B-N	Fase C-N
1	0	0	0	0	0	0	0
2	0,1282	0,0575	0,0908	0	0,1282	0,0575	0,0908
3	0,7401	0,3057	0,2722	1,0869	1,7676	1,1119	0,5650
4	1,2069	0,5159	0,4176	1,7979	2,8830	1,8758	0,9229
5	1,6711	0,7618	0,5564	2,5274	3,9928	2,7088	1,2877
6	1,6722	0,8510	0,6404	2,6180	4,0356	2,9174	1,3274
7	0,4969	0,3831	0,4113	1,2252	1,6258	1,3821	0,6514
8	0,4005	0,4422	0,4724	1,2257	1,5191	1,4942	0,6469
9	1,5985	0,6322	0,4382	2,3021	3,7991	2,3187	1,2361
10	1,7538	0,8642	0,6773	2,7291	4,2849	2,9673	1,5343
11	1,7150	0,7705	0,5803	2,5968	4,1345	2,7435	1,4092
12	1,7294	0,6482	0,4865	2,5021	4,1671	2,4370	1,4939
13	0,3690	0,4544	0,5105	1,2619	1,5467	1,5366	0,7308
14	0,4636	0,3986	0,4597	1,2805	1,6699	1,4446	0,7587

Nudo	Error medio (V)						
	Fase A	Fase B	Fase C	Fase N	Fase A-N	Fase B-N	Fase C-N
1	0	0	0	0	0	0	0
2	0,0289	0,0256	0,0510	0	0,0289	0,0256	0,0510
3	0,2007	0,1404	0,1534	0,4668	0,6335	0,5044	0,2404
4	0,3316	0,2380	0,2327	0,7513	1,0166	0,8350	0,3677
5	0,4845	0,3537	0,3019	1,0772	1,4478	1,2279	0,4850
6	0,4662	0,3978	0,3488	1,1135	1,4413	1,3235	0,5007
7	0,0712	0,1830	0,2384	0,5473	0,5183	0,6615	0,2700
8	0,0686	0,2143	0,2778	0,5420	0,4365	0,7178	0,2662
9	0,4156	0,2904	0,2471	0,9222	1,2645	1,0197	0,4304
10	0,4581	0,4044	0,3674	1,1375	1,4684	1,3452	0,5495
11	0,4784	0,3581	0,3141	1,0949	1,4640	1,2435	0,5152
12	0,4030	0,2985	0,2713	0,9603	1,2970	1,0572	0,4837
13	0,0893	0,2210	0,2990	0,5476	0,4089	0,7402	0,2871
14	0,0704	0,1916	0,2652	0,5595	0,4893	0,6929	0,2987

ANEXO II

En este anexo se van a recoger las direcciones de registros de los PLCs utilizados en los OLEs y VSGs, y de los analizadores de red. Es importante señalar que para estos últimos las direcciones estarán vendrán prefijadas por el fabricante. Por el contrario, dado que los PLCs son dispositivos que se programarán según el propósito que se le quieran dar, los registros se harán de acuerdo con las variables que se definan en dicho programa.

- Analizador de red

Una vez se configure el equipo en el menú de configuración *I/O Devices* de *Citect Studio*, se deberá seleccionar el protocolo *MODNET*. El direccionamiento de los tag de variable se hará considerando el tipo de dato al que se quiere acceder [19] [20]:

Tabla A–1. Rango de memoria según el tipo de dato en comunicaciones Modbus.

Tipo de dato	Acceso	Tamaño	Rango
Coil	Lectura y escritura	1 bit	1-10000
Discrete input	Lectura	1 bit	10001-20000
Input register	Lectura	16 bits	30001-40000
Holding register	Lectura y escritura	16 bits	40001-50000

Para la lectura de los parámetros aportado por los analizadores se utilizarán los tipos de datos *Holding Registers*. Las direcciones de las variables de las centrales de medida que se han utilizado para el SCADA se muestran a continuación:

Tabla A–2. Mapa de direcciones de las variables de las centrales de medida.

Corrientes					
Variable	Registro	Dirección	Unidad	Bytes	Tipo de dato
Current A	Holding	3000	A	2	FLOAT32
Current B	Holding	3002	A	2	FLOAT32
Current C	Holding	3004	A	2	FLOAT32
Current N	Holding	3006	A	2	FLOAT32
Tensiones					
Variable	Registro	Dirección	Unidad	Bytes	Tipo de dato
Voltage A-B	Holding	3020	V	2	FLOAT32
Voltage B-C	Holding	3022	V	2	FLOAT32
Voltage C-A	Holding	3024	V	2	FLOAT32
Voltage A-N	Holding	3028	V	2	FLOAT32
Voltage B-N	Holding	3030	V	2	FLOAT32
Voltage C-N	Holding	3032	V	2	FLOAT32
Potencias					
Variable	Registro	Dirección	Unidad	Bytes	Tipo de dato
Active Power A	Holding	3054	kW	2	FLOAT32
Active Power B	Holding	3056	kW	2	FLOAT32
Active Power C	Holding	3058	kW	2	FLOAT32
Active Power Total	Holding	3060	kW	2	FLOAT32
Reactive Power A	Holding	3062	kvar	2	FLOAT32
Reactive Power B	Holding	3064	kvar	2	FLOAT32

Reactive Power C	Holding	3066	kvar	2	FLOAT32
Reactive Power Total	Holding	3068	kvar	2	FLOAT32
Apparent Power A	Holding	3070	kvar	2	FLOAT32
Apparent Power B	Holding	3072	kVA	2	FLOAT32
Apparent Power C	Holding	3074	kVA	2	FLOAT32
Apparent Power Total	Holding	3076	kVA	2	FLOAT32

Las direcciones que se especifiquen en el dispositivo maestro se deberá considerar el rango de direcciones para este tipo de datos. Así, el Holding Register 43001 estaría accediendo a la dirección 3000 correspondiente a la corriente de la fase A (Tabla A-2).

- PLCs

En el caso de los PLCs de los OLEs y VSGs se deberá seleccionar el protocolo *MODNET30* en su configuración de dispositivo E/S. Este protocolo utiliza la sintaxis %MW para el direccionamiento de tags de variable [19] [20].

Las variables definidas en el programa del PLC de los OLEs y VSGs que se han utilizado en el SCADA son las siguientes:

Tabla A-3. Mapa de direcciones de las variables de los PLCs de los OLEs.

Registros de memoria de variables de control				
Variable	Registro	Unidad	Tipo de dato	Estado
Start	%MX100.0	--	BOOL	On/Off
Start Converter	%MX100.1	--	BOOL	On/Off
Start AC	%MX100.2	--	BOOL	On/Off
Start FSM	%MX100.3	--	BOOL	On/Off
P setpoints	%MX100.4	--	BOOL	On/Off
I setpoints	%MX100.5	--	BOOL	On/Off
P Bal ref	%MX100.6	--	BOOL	On/Off
P Unbal ref	%MX100.7	--	BOOL	On/Off
I Bal ref	%MX101.0	--	BOOL	On/Off
I Unbal ref	%MX101.1	--	BOOL	On/Off
Registros de memoria de medidas				
Variable	Registro	Unidad	Tipo de dato	Escala
P ref	%MD200	W	REAL	1
Q ref	%MD201	var	REAL	1
Pa ref	%MD202	W	REAL	1
Pb ref	%MD203	W	REAL	1
Pc ref	%MD204	W	REAL	1
Qa ref	%MD205	var	REAL	1
Qb ref	%MD206	var	REAL	1
Qc ref	%MD207	var	REAL	1
Id ref	%MD208	A	REAL	0,001
Iq ref	%MD209	A	REAL	0,001
Re a	%MD210	A	REAL	0,001
Re b	%MD211	A	REAL	0,001
Re c	%MD212	A	REAL	0,001
Im a	%MD213	A	REAL	0,001
Im b	%MD214	A	REAL	0,001
Im c	%MD215	A	REAL	0,001
I a	%MD216	A	REAL	0,01
I b	%MD217	A	REAL	0,01
I c	%MD218	A	REAL	0,01

U a	%MD219	V	REAL	0,01
U b	%MD220	V	REAL	0,01
U c	%MD221	V	REAL	0,01
P a	%MD222	W	REAL	1
P b	%MD223	W	REAL	1
P c	%MD224	W	REAL	1
Q a	%MD225	var	REAL	1
Q b	%MD226	var	REAL	1
Q c	%MD227	var	REAL	1
U dc	%MD228	V	REAL	0,1
I n	%MD230	A	REAL	0,01
Fault	%MW458	--	INT	1
Omega_pll	%MW459	rad/s	INT	1
Registros de memoria de entradas y salidas digitales				
Variable	Registro	Unidad	Tipo de dato	Estado
Kaux	%QX0.4	Salida digital	BOOL	--
Kaux read	%IX0.8	Entrada digital	BOOL	--
KG	%QX0.6	Salida digital	BOOL	--
KG read	%IX0.10	Entrada digital	BOOL	--

Tabla A-4. Mapa de direcciones de las variables de los PLCs de los VSGs.

Registros de memoria de variables de control				
Variable	Variable	Variable	Variable	Variable
start FSM	%MX802.0	--	BOOL	On/Off
start AC	%MX802.1	--	BOOL	On/Off
start DC	%MX802.2	--	BOOL	On/Off
sync	%MX802.3	--	BOOL	On/Off
Enable Pref	%MX802.4	--	BOOL	On/Off
Enable HFPS	%MX802.5	--	BOOL	On/Off
Enable AHF	%MX802.6	--	BOOL	On/Off
start Primary FSM AC	%MX802.7	--	BOOL	On/Off
start	%MX804.0	--	BOOL	On/Off
P setpoints	%MX804.1	--	BOOL	On/Off
I setpoints	%MX804.2	--	BOOL	On/Off
P pri setpoints	%MX804.3	--	BOOL	On/Off
I pri setpoints	%MX804.4	--	BOOL	On/Off
Registros de memoria de medidas				
Variable	Variable	Variable	Variable	Variable
I a	%MD100	A	REAL	0,1
I b	%MD101	A	REAL	0,1
I c	%MD102	A	REAL	0,1
U a	%MD103	V	REAL	0,1
U b	%MD104	V	REAL	0,1
U c	%MD105	V	REAL	0,1
P a	%MD106	W	REAL	1
P b	%MD107	W	REAL	1
P c	%MD108	W	REAL	1
Q a	%MD109	var	REAL	1
Q b	%MD110	var	REAL	1
Q c	%MD111	var	REAL	1
S a	%MD112	VA	REAL	1
S b	%MD113	VA	REAL	1

S_c	%MD114	VA	REAL	1
f	%MD115	Hz	REAL	1
U_d	%MD116	V	REAL	0,1
U_q	%MD117	V	REAL	0,1
I_d	%MD118	A	REAL	0,01
I_q	%MD119	A	REAL	0,01
U_dc	%MD120	V	REAL	0,1
P_g	%MD121	W	REAL	1
P_3f	%MD122	W	REAL	1
Q_3f	%MD123	var	REAL	1
Fault	%MW248	--	INT	1
CTRL	%MW248	--	INT	1
I_l	%MD125	A	REAL	0,01
TestID	%MW252	--	INT	1
Puc_ref	%MD127	W	REAL	1
Duty_DC	%MD128	--	REAL	0,001
Omega_pll	%MD129	rad/s	REAL	1
Omega_uvsg	%MD130	rad/s	REAL	1
I_h	%MD131	A	REAL	0,01
Eta_pk	%MD132	--	REAL	0,001
P_pri	%MD133	W	REAL	1
P_pri_fil	%MD134	W	REAL	1
P_losses	%MD135	W	REAL	1
P_HFPS	%MD136	W	REAL	1
Udc_primary	%MD137	V	REAL	0,1
Ua_primary	%MD138	V	REAL	0,1
Ub_primary	%MD139	V	REAL	0,1
Uc_primary	%MD140	V	REAL	0,1
Omega_primary	%MD141	rad/s	REAL	1
Ia_primary	%MD142	A	REAL	0,1
Ib_primary	%MD143	A	REAL	0,1
Ic_primary	%MD144	A	REAL	0,1
Fault_primary	%MW290	--	REAL	1
Pa_primary	%MD146	W	REAL	1
Pb_primary	%MD147	W	REAL	1
Pc_primary	%MD148	W	REAL	1
Qa_primary	%MD149	var	REAL	1
Qb_primary	%MD150	var	REAL	1
Qc_primary	%MD151	var	REAL	1
U_l	%MD152	V	REAL	0,1
Etas_abc	%MD153	--	REAL	0,001
Duty_DC_send	%MD154	--	REAL	0,001
Id_ref	%MD155	A	REAL	0,1
Iq_ref	%MD156	A	REAL	0,1
Vh_min	%MD157	V	REAL	1
Vrms_min	%MW316	V	UINT	1
H	%MD159	s	REAL	1
Vh_ref	%MD160	V	REAL	1
Vuc_ref	%MD161	V	REAL	1
Id_primary	%MD162	A	REAL	1
Iq_primary	%MD163	A	REAL	1
Vdc_min_primary	%MD164	V	REAL	1
Vrms_min_primary	%MD165	V	REAL	1

I _{abc} max	%MD166	A	REAL	1
I _l max	%MD167	A	REAL	1
I _l ref	%MD168	A	REAL	0,01
V _h min PLC	%MD169	V	REAL	1
V _h min manual	%MD170	V	REAL	1
P _{pu} ref	%MD171	pu	REAL	0,001
Q _{pu} ref	%MD172	pu	REAL	0,001
P _{pri pu} ref	%MD173	pu	REAL	0,001
Q _{pri pu} ref	%MD174	pu	REAL	0,001
I _d pri ref	%MD175	A	REAL	1
I _q pri ref	%MD176	A	REAL	1
Ramp rate HFPS	%MD177	--	REAL	1

Registros de memoria de entradas y salidas digitales

Variable	Registro	Unidad	Tipo de dato	Estado
Kaux	%QX0.4	--	BOOL	On/Off
Kaux read	%IX0.8	--	BOOL	On/Off
KG	%QX0.6	--	BOOL	On/Off
KG read	%IX0.10	--	BOOL	On/Off
KS	%QX0.7	--	BOOL	On/Off
KS read	%IX0.11	--	BOOL	On/Off

REFERENCIAS

- [1] European Commission, [Online]. Available: https://climate.ec.europa.eu/eu-action/climate-strategies-targets/2030-climate-energy-framework_en.
- [2] European Environment Agency, “European Environment Agency,” 26 October 2022. [Online]. Available: <https://www.eea.europa.eu/ims/new-registrations-of-electric-vehicles>.
- [3] European parliament, [Online]. Available: [https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/ATAG/2020/651944/EPRS_ATA\(2020\)651944_EN.pdf](https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/ATAG/2020/651944/EPRS_ATA(2020)651944_EN.pdf).
- [4] CIGRE, “Benchmark systems for network integration of renewable and distributed energy resources,” [Online]. Available: https://e-cigre.org/publication/ELT_273_8-benchmark-systems-for-network-integration-of-renewable-and-distributed-energy-resources.
- [5] M. Á. Moreno, "Diseño de una red de baja tensión a escala".
- [6] J. M. Maza Ortega, M. Barragán Villarejo, F. d. P. García López, J. Jiménez, J. M. Mauricio, L. Alvarado Barrios y A. Gómez Expósito, «A multi-platform lab for teaching and research in active distribution networks,» *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 32, nº 6, pp. 4861-4870, 2017.
- [7] T. A. Short, *Electric Power Distribution*, CRC Press, 2004.
- [8] A. Gómez Expósito, J. L. Martínez Ramos, J. A. Rosendo Macía, E. Romero Ramos y J. M. Riquelme Santos, *Fundamentos de Teoría de Circuitos*, Paraninfo, 2008.
- [9] D. Bailey and E. Wright, “Practical SCADA for Industry,” 2003. [Online]. Available: https://repository.unad.edu.co/bitstream/handle/10596/5004/Practical_SCADA_for_Industry-1-110.pdf?sequence=1. [Accessed 21 October 2022].
- [10] A. Benelux, “Process control and automation using modbus protocol,” [Online]. Available: <http://www.ampliconbenelux.com/docs/MODBUS-in-Process-control.pdf>. [Accessed 1 November 2022].
- [11] W. Bolton, “Programmable Logic Controllers,” 2006. [Online]. Available: [https://www.etf.ues.rs.ba/~slubura/Procesni%20racunari/Programmable%20Logic%20Controllers%204th%20Edition%20\(W%20Bolton\).pdf](https://www.etf.ues.rs.ba/~slubura/Procesni%20racunari/Programmable%20Logic%20Controllers%204th%20Edition%20(W%20Bolton).pdf). [Accessed 2 November 2022].
- [12] Schneider Electric, “Modicon M241 - Controlador M241 24 ES Transistor PNP Ethernet,” [Online]. Available: <https://www.se.com/es/es/product/TM241CEC24T/modicon-m241-controlador-m241-24-es-transistor-pnp-ethernet/>.

- [13] J. Trujillo Soto, "Control desequilibrado de VSCs a cuatro hilos conectados a red. Desde simulación hasta su implementación hardware".
- [14] Schneider Electric, "PM5320 - Central de medida," [Online]. Available: <https://www.se.com/es/es/product/METSEPM5320/pm5320-central-de-medida-ethernet-hasta-31-h-256k-2di-2do-35-alarmas/>.
- [15] Schneider Electric, "Transformadores de corriente," [Online]. Available: https://download.schneider-electric.com/files?p_enDocType=Catalog&p_File_Name=PLSED310126EN_%28Web%29.pdf&p_Doc_Ref=PLSED310126EN_Web&_ga=2.72882330.825496967.1669367585-457674198.1669367585.
- [16] Á. Rodríguez del Nozal, E. O. Kontis, J. M. Mauricio y C. S. Demoulias, «Provision of inertial response as ancillary service from active distribution networks to the transmission system,» *IET Gener. Transm. Distrib.*, nº 14, pp. 5123-5134, 2020.
- [17] E. O. Kontis, Á. Rodríguez del Nozal, J. M. Mauricio y C. S. Demoulias, «Provision of Primary Frequency Response as Ancillary Service From Active Distribution Networks to the Transmission System,» *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 12, nº 6, pp. 4971-4982, 2021.
- [18] A. Mihai Gross, K. Nefeli Malamaki, M. Barragán Villarejo, G. C. Kryonidis, F. J. Matas Díaz, S. I. Gkavanoudis, J. M. Mauricio, J. M. Maza Ortega y C. S. Demoulias, «Energy Management In Converter-Interfaced Renewable Energy Sources Through Ultracapacitors For Provision Of Ancillary Services,» *International Conference on Smart Energy Systems and Technologies (SEST)*, pp. 1-6, 2021.
- [19] A. Rodríguez Penin, "Citect SCADA 2016 - Manual de formación Nivel 1", 2019.
- [20] Modbus.org, "www.modbus.org," 24 October 2006. [Online]. Available: https://modbus.org/docs/Modbus_Messaging_Implementation_Guide_V1_0b.pdf. [Accessed 4 November 2022].

