

Trabajo Fin de Grado
Ingeniería de la Energía

Estudio de viabilidad de una red de distribución
híbrida CA/CC en baja tensión

Autor: Carmen M^a Gómez Martín-Prieto

Tutor: Francisco de Paula García López

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

Sevilla, 2020



Trabajo Fin de Grado
Ingeniería de la Energía

Estudio de viabilidad de una red de distribución híbrida CA/CC en baja tensión

Autor:

Carmen M^a Gómez Martín-Prieto

Tutor:

Francisco de Paula García López

Profesor Sustituto Interino

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

Sevilla, 2020

Trabajo Fin de Grado: Estudio de viabilidad de una red de distribución híbrida CA/CC en baja tensión

Autor: Carmen M^a Gómez Martín-Prieto

Tutor: Francisco de Paula García López

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

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2020

El Secretario del Tribunal

A mi familia

Agradecimientos

A mis profesores por los conocimientos y ganas de aprender que me han transmitido durante este periodo universitario.

A mi tutor, Francisco de Paula García López, por su implicación, apoyo, disposición y motivación, sin su orientación no hubiese podido desarrollar este trabajo fin de grado.

A mis amigos por todos los momentos y experiencias inolvidables que hemos vivido en esta etapa de nuestra vida.

A mi familia por el apoyo y motivación que me han dado siempre.

Carmen M^a Gómez Martín-Prieto

Sevilla, 2020

Resumen

Las redes de distribución de energía eléctrica en baja tensión (BT) son las encargadas de realizar el reparto de la electricidad desde los centros de transformación MT/BT hasta los lugares donde existe un punto de consumo. Estas redes deben garantizar un servicio y una calidad al consumidor, pero al menor coste posible. Un parámetro importante que tienen que cumplir es mantener los valores de tensión nominal dentro de un rango determinado, teniendo presente la flexibilidad de la demanda. Además, hay que tener presente que hoy en día todo a nuestro alrededor está desarrollándose con un cariz más inteligente e interconectado. En este sentido, y aplicado a redes de distribución, se están creando una serie de sistemas Smart-Grid que permiten controlar y gestionar de forma eficiente y segura las redes y todos los dispositivos que la integran, siendo en un futuro posible incluso la gestión entre usuarios.

Por otra parte, también hay que tener en cuenta el gran auge que está teniendo la implementación de los vehículos eléctricos y de la generación distribuida en la sociedad. Esto se está viendo incentivado por el deseo de la descarbonización, principalmente en el transporte, el uso de energías renovables y la idea de no depender de las compañías eléctricas para poder tener energía, optando para ello por el autoabastecimiento energético mediante el empleo de fuentes de energías renovables.

Teniendo presente la situación actual y el panorama futuro que se presenta, se pueden dividir los tipos de dispositivos conectados a las redes de distribución BT entre elementos corriente alterna (CA) y elementos corriente continua (CC), dado que, además de disponer de las cargas convencionales, se están integrando cargas y generación de tipo CC. Este tipo de cargas CC son el vehículo eléctrico, como principal exponente, y otro tipo de cargas actuales que tienen una etapa de conversión CA/CC, como pueden ser los aires acondicionados y otros elementos similares. Por otro lado, en términos de generación, los paneles fotovoltaicos son un claro ejemplo de un sistema CC con una etapa de conversión CC/CA en su configuración actual.

Poniendo en consideración todas estas ideas, se puede concluir que debido al cambio que se presenta en nuestros hábitos de consumo, y que, muy probablemente el aumento de consumo en CC se va a elevar de forma muy acusada, es necesario replantear el concepto convencional de la distribución en BT que se conoce hasta ahora. En este sentido este Trabajo de Fin de Grado, plantea una modificación de las redes de distribución BT convencionales, la cual consiste en crear redes híbridas de distribución CA/CC eficientes en BT para minimizar el impacto del cambio que está habiendo en la situación energética actual. Para realizar el estudio, se plantean una serie de escenarios distintos para poner la red híbrida a prueba con modificaciones en la carga (viviendas, vehículos eléctricos y generación distribuida) de las redes CA y CC. Los escenarios se exponen en dos casos con distinta fuente de alimentación, uno en trifásica y el otro en monofásica. A su vez, de la red de CC hay dos configuraciones para la sección del cable con el fin de ver cuál se ajusta mejor a las condiciones demandadas.

Abstract

Low-voltage electricity distribution networks are in charge of distributing electricity from the MV / LV transformation centers to places where there is a point of consumption. These networks must guarantee a service and quality to the consumer, but at the lowest possible cost. An important parameter to be met is to keep the nominal voltage values within a certain range, keeping in mind the flexibility of the demand. In addition, it must be borne in mind that today everything around us is developing with a more intelligent and interconnected aspect. In this sense, and applied to distribution networks, a series of Smart-Grid systems are being created that allow the networks and all the devices that comprise them to be controlled and managed efficiently and safely, with future management even possible between users.

On the other hand, we must also take into account the great boom that the implementation of electric vehicles and distributed generation is having in society. This is being encouraged by the desire for decarbonisation, mainly in transport, the use of renewable energy and the idea of not depending on electricity companies for energy, opting for this by self-sufficiency in energy through the use of energy sources.

Taking into account the current situation and the future outlook that is presented, the types of devices connected to the BT distribution networks can be divided between AC elements and DC elements, since, in addition to having conventional loads, loads are being integrated and DC type generation. This type of DC loads are the electric vehicle, as the main exponent, and other types of current loads that have an AC / DC conversion stage, such as air conditioners and other similar elements. On the other hand, in terms of generation, photovoltaic panels are a clear example of a DC system with a DC / AC conversion stage in its current configuration.

Taking all these ideas into consideration, it can be concluded that due to the change that occurs in our consumption habits, and that, most likely, the increase in consumption in DC is going to rise very sharply, it is necessary to rethink the conventional agreement of the distribution in BT that is known so far. In this sense, this Final Degree Project proposes a modification of conventional BT distribution networks, which consists of creating efficient hybrid AC / DC distribution networks in BT to minimize the impact of the change that is taking place in the current energy situation. To carry out the study, a series of different scenarios are proposed to test the mixed network with modifications in the load (homes, electric vehicles and distributed generation) of the AC and DC networks. The scenarios are presented in two cases with a different power supply, one in three-phase and the other in single-phase. In turn, of the DC network there are two configurations for the cable section in order to see which one best suits the demanded conditions.

ÍNDICE

Agradecimientos	I
Resumen	III
Abstract	V
Índice	VI
Índice de Tablas	VIII
Índice de Figuras	X
Notación	XIII
1 Introducción	1
1.1 <i>Objetivos</i>	4
2 Configuración de los casos de estudio	5
2.1 <i>Red de distribución CA elegida</i>	5
2.2 <i>Caso monofásico (Caso 1)</i>	7
2.2.1 Configuración 1 de la red de CC para el caso monofásico	7
2.2.2 Configuración 2 de la red de CC para el caso monofásico	8
2.3 <i>Caso trifásico (Caso2)</i>	9
2.3.1 Configuración 1 de la red de CC para el caso trifásico	10
2.3.2 Configuración 2 de la red de CC para el caso trifásico	11
3 Escenarios de estudio	13
3.1 <i>Escenario 0: Red de distribución CA en BT actual</i>	13
3.2 <i>Escenario 1: Red de distribución CA en BT con carga habitual y VE conjuntamente (sin red CC)</i>	15
3.3 <i>Escenario 2: Red de distribución en CA con carga habitual, VE y GD conjuntamente (sin red CC)</i>	17
3.4 <i>Escenario 3: Red híbrida CA/CC con vivienda en la red CA y VE en la red CC</i>	18
3.5 <i>Escenario 4: Red híbrida CA/CC con vivienda junto con GD en la red CA y VE en la red CC</i>	20
3.6 <i>Escenario 5: Red híbrida CA/CC con vivienda en la red CA y VE junto con GD en la red CC</i>	20
4 Modelos de estudio en Simulink	23
4.1 <i>Simulink</i>	23
4.2 <i>Red con CA</i>	23
4.2.1 Similitudes entre el caso monofásico y el caso trifásico	23
4.2.2 Diferencias entre el caso monofásico y el caso trifásico	24
4.3 <i>Red con CC</i>	28
4.3.1 Similitudes entre las dos configuraciones de la red de CC	28
4.3.2 Diferencias entre las dos configuraciones de la red de CC	31
5 Resultados de los escenarios de estudio	33
5.1 <i>Red de CA</i>	33
5.2 <i>Red híbrida CA/CC</i>	36
5.3 <i>Comparación de los escenarios de estudio entre el caso monofásico y el caso trifásico</i>	39
6 Conclusiones	45
6.1 <i>Líneas futuras</i>	46
7 Bibliografía	47

8	Anexo	49
8.1	<i>Caso monofásico (Caso 1)</i>	49
8.1.1	Red de distribución en BT actual con carga equivalente a vivienda (escenario 0)	49
8.1.2	Escenario 1: red CA con carga de vivienda y VE	50
8.1.3	Escenario 2: red CA con carga equivalente a vivienda junto con VE junto con GD	51
8.1.4	Red híbrida. Configuración 1 para la red de CC	52
8.1.5	Configuración 2 para la red de CC	57
8.2	<i>Caso trifásico (Caso 2)</i>	61
8.2.1	Red de distribución doméstica en BT con CA (escenario 0)	62
8.2.2	Escenario 1: red de CA con carga de vivienda junto con VE	62
8.2.3	Escenario 2: red de CA con carga de vivienda junto con VE junto con GD	63
8.2.4	Configuración 1 para la red de CC	64
8.2.5	Configuración 2 para la red de CC	68

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2-1. Datos red de distribución CA en BT elegida	6
Tabla 2-2. Datos configuración 1 de la red de distribución CC en BT	8
Tabla 2-3. Datos configuración 2 de la red de distribución CC en BT	9
Tabla 3-1. Potencia por nudo en red de distribución en BT actual para el caso monofásico	15
Tabla 3-2. Potencia por nudo en red de distribución en BT actual para el caso trifásico	15
Tabla 3-3. Potencia por nudo en red CA con vivienda y VE para el caso monofásico	16
Tabla 3-4. Potencia por nudo en red de CA con vivienda y VE para el caso trifásico	16
Tabla 3-5. Potencia por nudo en red CA con vivienda, VE y GD para el caso monofásico	18
Tabla 3-6. Potencia por nudo en red CA con vivienda, VE y GD para el caso trifásico	18
Tabla 3-7. Potencia por nudo en red CC con VE para el caso monofásico	19
Tabla 3-8. Potencia por nudo en red CC con VE para el caso trifásico	19
Tabla 3-9. Potencia por nudo en red de CA con vivienda y GD para el caso monofásico	20
Tabla 3-10. Potencia por nudo en red de CA con vivienda y GD para el caso trifásico	20
Tabla 3-11. Potencia por nudo en red de CC con VE y GD para el caso monofásico	21
Tabla 3-12. Potencia por nudo en red de CC con VE y GD para el caso trifásico	21
Tabla 8-1. Resultados Simulink red de distribución en BT actual (escenario 0)	50
Tabla 8-2. Resultados de los cálculos escenario 0 caso monofásico	50
Tabla 8-3. Resultados Simulink escenario 1 caso monofásico	51
Tabla 8-4. Resultados de los cálculos escenario 1 caso monofásico	51
Tabla 8-5. Resultados Simulink escenario 2 caso monofásico	52
Tabla 8-6. Resultados de los cálculos escenario 2 caso monofásico	52
Tabla 8-7. Resultados Simulink escenario 3 caso monofásico (opción 1 de la red de CC)	53
Tabla 8-8. Resultados de los cálculos escenario 3 caso monofásico (opción 1 de la red de CC)	53
Tabla 8-9. Resultados Simulink escenario 4 caso monofásico (opción 1 de la red de CC)	54
Tabla 8-10. Resultados cálculos escenario 4 caso monofásico (opción 1 de la red de CC)	55
Tabla 8-11. Resultados Simulink escenario 5 caso monofásico (opción 1 de la red de CC)	56
Tabla 8-12. Resultados de los cálculos escenario 5 caso monofásico (opción 1 de la red de CC)	56
Tabla 8-13. Resultados Simulink escenarios 3 caso monofásico (opción 2 de la red de CC)	57
Tabla 8-14. Resultados cálculos escenarios 3 caso monofásico (opción 2 de la red de CC)	58
Tabla 8-15. Resultados Simulink escenario 4 caso monofásico (opción 2 de la red de CC)	59
Tabla 8-16. Resultados de los cálculos escenario 4 caso monofásico (opción 2 de la red de CC)	59
Tabla 8-17. Resultados Simulink escenario 5 caso monofásico (opción 2 de la red de CC)	60
Tabla 8-18. Resultados cálculos escenario 5 caso monofásico (opción 2 de la red de CC)	61
Tabla 8-19. Resultados Simulink escenario 0 caso trifásico	62

Tabla 8-20. Resultados de los cálculos escenario 0 caso trifásico	62
Tabla 8-21. Resultados Simulink escenario 1 trifásica (Red AC vivienda y VE)	63
Tabla 8-22. Resultados de los cálculos escenario 1 trifásica (Red AC vivienda y VE)	63
Tabla 8-23. Resultados Simulink escenario 2 caso trifásico	63
Tabla 8-24. Resultados de los cálculos escenario 2 caso trifásico	64
Tabla 8-25. Resultados Simulink escenario 3 caso trifásico (opción 1 de la red de CC)	64
Tabla 8-26. Resultados de los cálculos escenario 3 caso trifásico (opción 1 de la red de CC)	65
Tabla 8-27. Resultados Simulink escenario 4 caso trifásico (opción 1 de la red de CC)	66
Tabla 8-28. Resultados cálculos escenario 4 caso trifásico (opción 1 de la red de CC)	66
Tabla 8-29. Resultados Simulink escenario 5 caso trifásico (opción 1 de la red de CC)	67
Tabla 8-30. Resultados de los cálculos escenario 5 caso trifásico (opción 1 de la red de CC)	68
Tabla 8-31. Resultados Simulink escenarios 3 caso trifásico (opción 2 de la red de CC)	69
Tabla 8-32. Resultados cálculos escenarios 3 caso trifásico (opción 2 de la red de CC)	69
Tabla 8-33. Resultados Simulink escenario 4 caso trifásico (opción 2 de la red de CC)	70
Tabla 8-34. Resultados de los cálculos escenario 4 caso trifásico (opción 2 de la red de CC)	71
Tabla 8-35. Resultados Simulink escenario 5 caso trifásico (opción 2 de la red de CC)	72
Tabla 8-36. Resultados cálculos escenario 5 caso trifásico (opción 2 de la red de CC)	72

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1. Objetivos energéticos europeos para 2020, 2030 y 2050	1
Figura 1-2. Demanda energética incluyendo la recarga de un VE	3
Figura 1-3. Ejemplo esquema de red de distribución BT híbrida para uso doméstico	4
Figura 2-1. Red de distribución en BT de CA elegida	6
Figura 2-2. Ejemplo red híbrida CA/CC siendo la red de CA monofásica	7
Figura 2-3. Configuración 1 de la red de CC para red híbrida CA/CC caso monofásico	8
Figura 2-4. Configuración 2 de la red de CC para red híbrida CA/CC caso monofásico	9
Figura 2-5. Ejemplo red híbrida CA/CC siendo la red de CA trifásica	10
Figura 2-6. Configuración 1 de la red CC para red híbrida CA/CC caso trifásico	10
Figura 2-7. Configuración 2 de la red CC para red híbrida CA/CC caso trifásico	11
Figura 3-1. Red de distribución en BT actual en CA para el caso monofásico	14
Figura 3-2. Red de distribución en BT actual en CA para el caso trifásico	14
Figura 3-3. Red CA con vivienda junto con VE para el caso monofásico	17
Figura 3-4. Red CA con vivienda junto con VE para el caso trifásico	17
Figura 3-5. Red híbrida CA/CC con VE en red CC y vivienda en red CA para el caso monofásico	19
Figura 4-1. Nudo 11 de la red con CA en el caso monofásico	24
Figura 4-2. Nudo 11 de la red con CA en el caso trifásico	24
Figura 4-3. Nudo 2 de la red con CA en el caso monofásico	25
Figura 4-4. Red de CA del caso trifásico representada en Simulink	26
Figura 4-5. Red de CA del caso monofásico representada en Simulink	27
Figura 4-6. Nudo 12 de la red de CC	28
Figura 4-7. Red híbrida CA/CC para el caso monofásico representada en Simulink	29
Figura 4-8. Red híbrida CA/CC para el caso trifásico representada en Simulink	29
Figura 5-1. Caída de tensión de los escenarios 0, 1 y 2 del caso monofásico	34
Figura 5-2. Pérdida de potencia activa de los escenarios 0, 1 y 2 del caso monofásico	34
Figura 5-3. Caída de tensión de los escenarios 0, 1 y 2 del caso trifásico	35
Figura 5-4. Pérdida de potencia activa de los escenarios 0, 1 y 2 del caso trifásico	35
Figura 5-5. Caída de tensión en la red de CC en los escenarios 3, 4 y 5 del caso monofásico	37
Figura 5-6. Pérdida de potencia activa en la red de CC en los escenarios 3, 4 y 5 del caso monofásico	37
Figura 5-7. Caída de tensión en la red de CC en los escenarios 3, 4 y 5 del caso trifásico	38
Figura 5-8. Pérdida de potencia activa en la red de CC en los escenarios 3, 4 y 5 del caso trifásico	38
Figura 5-9. Caída de tensión del nudo 12 en los escenarios 3, 4 y 5 de los diferentes casos de estudio	39
Figura 5-10. Caída de tensión del nudo 8 en los escenarios 3, 4 y 5 de los diferentes casos de	

estudio	40
Figura 5-11. Pérdida de potencia activa del nudo 12 en los escenarios 3, 4 y 5 de los diferentes casos de estudio	41
Figura 5-12. Pérdida de potencia activa del nudo 8 en los escenarios 3, 4 y 5 de los diferentes casos de estudio	42

Notación

A	Amperio
BT	Red de distribución de baja tensión
CA	Corriente alterna
CC	Corriente continua
ETSI	Escuela Técnica Superior de Ingeniería (Sevilla)
GD	Generación distribuida
I	Intensidad
ITC-BT-10	Guía técnica de la ITC-BT-10 del REBT
ITC-BT-52	Guía técnica de la ITC-BT-52 del REBT
kV	Kilovoltio
kW	Kilovatio
L	Inductancia
MT	Red de distribución de media tensión
P	Potencia Activa
P_{loss}	Pérdida de potencia activa en la línea
Q_{loss}	Pérdida de potencia reactiva en la línea
R	Resistencia
REBT	Reglamento Electrónico de Baja Tensión
REE	Red Eléctrica de España
UG1	Línea principal de la red AC/DC
UG3	Línea secundaria de la red AC/DC
V	Voltio
Ω	Ohmio
var	Voltio-amperio reactiva
VE	Vehículo eléctrico
V_e	Tensión en cabeza de la red
V_r	Tensión final de línea
W	Vatio
X	Reactancia
ΔV	Caída de tensión

1 INTRODUCCIÓN

Hoy en día, es innegable que el cambio climático está afectando de forma acuciante a nuestra sociedad y es necesario actuar para mitigar dicho problema. En este sentido, se está trabajando para construir un planeta más sostenible. Para conseguirlo, por parte del sector eléctrico, se está trabajando para que el sistema energético existente evolucione hacia un futuro donde las energías limpias tengan un peso mayor que las convencionales. Por ello, en las últimas décadas, se ha tomado una conciencia mayor sobre las emisiones de gases contaminantes y su influencia en el cambio climático, empezando a crear la mayoría de los países medidas para disminuir el impacto que tienen, mediante la firma de acuerdos y leyes, donde se establecen porcentajes sobre la cantidad de gases que se expulsan a la atmósfera, como el Protocolo de Kioto de 2012 y el Marco 2030, además de otras restricciones, mostradas algunas en la Figura 1-1 que contiene los objetivos energéticos europeos para 2020, 2030 y 2050 recogidos por Red Eléctrica de España (REE) [1]. Este tipo de normativas y leyes tienen un carácter muy amplio que abarca múltiples estados y niveles de actuación.

Objetivos energéticos europeos

Objetivos 2020	20% reducción de emisiones de GEI frente a niveles de 1990	20% de energías renovables en la UE	20% de mejora de la eficiencia energética	
Objetivos 2030	40% reducción de emisiones de GEI frente a niveles de 1990	32% de energías renovables en la UE	32,5% de mejora de la eficiencia energética	15% para interconexiones eléctricas
Objetivos 2050	85-90% reducción de emisiones de GEI frente a niveles de 1990			

Figura 1-1. Objetivos energéticos europeos para 2020, 2030 y 2050

Gracias a esta nueva forma de plantear el futuro energético, y con el objetivo de aprovechar este cambio de concepto, las redes de distribución, los consumidores, los generadores y todo agente que interfiere en el sistema eléctrico está renovándose e integrando una mayor gestión de sus infraestructuras. En concreto, las redes de distribución domésticas cada vez tienen un carácter más inteligente debido a que se les están añadiendo dispositivos para controlarlas y gestionarlas de forma eficiente y segura, como puede ser el Smart Meter. Aunque se están incluyendo ciertas mejoras, no son suficientes para la demanda energética que se espera en unos años, dado que, hay que tener en cuenta el gran auge que está teniendo la implementación de los vehículos eléctricos (VEs) y de la generación distribuida (GD). Tanto los VEs como la GD, se están viendo incentivados por el deseo de descarbonización, principalmente en el transporte, el incremento del uso de energías renovables, lo cual disminuye la dependencia de terceros países importadores de combustibles fósiles y la idea de disminuir la dependencia de las compañías eléctricas para poder disponer de energía, optando para ello por el autoabastecimiento energético mediante el empleo de fuentes de energías renovables.

Ante esta situación, se pueden diferenciar dos grandes campos en los que se puede actuar para reducir

el efecto que causa sobre el cambio climático. Uno de estos campos es el referido a las fuentes de obtención de energía, el otro al uso que a esta se le da.

En el caso de generación de energía, cada vez se desarrolla e implementa más su obtención mediante las fuentes de energía renovables, pues reducen considerablemente la emisión de CO₂ en comparación con las fuentes de energía convencionales. A su vez, esto plantea un inconveniente, ya que, al no ser posible gestionar la materia prima de las fuentes renovables según las necesidades de la demanda, se hace vital la necesidad de almacenar la energía para su gestión posterior, o en caso contrario, perder esa materia prima por no poder darle uso. En el caso de querer aprovechar la materia prima en toda su disponibilidad, aparece el reto tecnológico del almacenamiento de energía, cuyo objetivo no está contemplado en este documento, pero que es de vital importancia para el futuro desarrollo de estos conceptos. Para lograrlo, International Renewable Energy Agency (IRENA) estima para 2030 un crecimiento, a nivel mundial, del empleo de la energía solar fotovoltaica [2]. Además todo esto conllevará un importante desarrollo de los sistemas de almacenamiento energético para poder obtener la flexibilidad que se desea con estos cambios. Para conseguirlo, IRENA estima que habrá un crecimiento de la potencia instalada en sistemas de almacenamiento desde 1GW actual hasta 250 GW en 2030 [3].

También es necesario tener presente los nuevos hábitos de consumo, por ejemplo, hace unos años era impensable que el transporte mediante energía eléctrica fuera accesible a los ciudadanos, hecho que hoy en día está totalmente implantado. Por ello, hay que tener presente un nuevo agente en el panorama de consumo eléctrico siendo este el VE. Para proceder a la carga de este nuevo agente, actualmente hay puntos de carga rápida de VE a los que se puede acceder en estaciones de servicio, aparcamientos de centros comerciales, electrolinerías específicas en las ciudades, etc. pero la tendencia es que se pueda realizar su carga en las viviendas, previsiblemente en horario nocturno. Una vez que dicha tendencia esté más consolidada en la sociedad, conllevará modificaciones en el comportamiento de la curva de demanda energética que actualmente existe puesto que la tendencia será suavizar la curva disminuyendo las zonas pico y valle, como se puede observar en la Figura 1-2 obtenida de REE [4], siendo la línea amarilla la curva de demanda energética que actualmente existe, representando la línea azul la curva de demanda cuando haya VEs en todos los hogares. Para conseguirlo, se prevé un aumento de la flota de VEs a nivel mundial para 2030, llegando a 125 millones de VEs según el Escenario de Nuevas Políticas de International Energy Agency (IEA), incluso pudiendo ser este número aún mayor de lo previsto [5]. Además, surgirá el inconveniente de que la red de distribución actual no será capaz de abastecer a todos los usuarios ya que se puede llegar a saturar cuando la mayoría de los ciudadanos dispongan de VEs junto con otros equipos que demanden gran cantidad de energía.

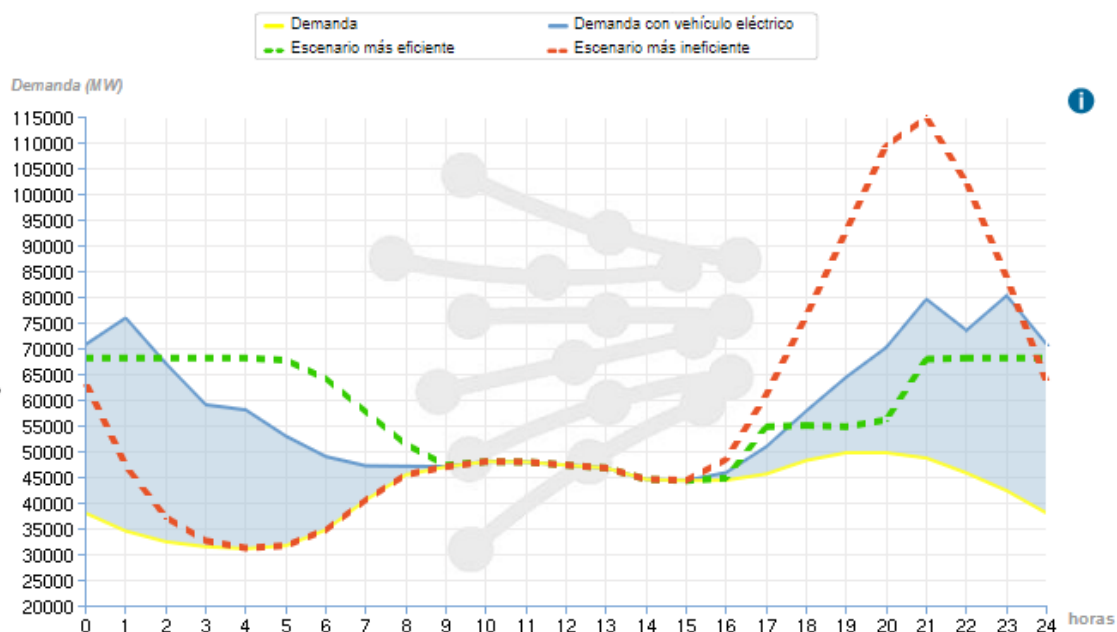


Figura 1-2. Demanda energética incluyendo la recarga de un VE

Dada la situación que se avecina, las redes de distribución de energía eléctrica son un factor fundamental debido a que son las encargadas de que llegue la electricidad desde el centro de transformación MT/BT hasta las viviendas, locales, industria, etc, para que estas puedan usarlo en sus actividades cotidianas. Las redes de distribución tienen que aportar las tensiones nominales con variaciones mínimas y permitir flexibilidad en la red en caso de que varíe la demanda.

Actualmente, la distribución y las instalaciones para la energía eléctrica están diseñadas casi en su totalidad para CA, ya que la mayoría de los equipos unidos a la red trabajan con este tipo de corriente. En el caso de los elementos electrónicos que utilizan CC se requieren convertidores individuales cada vez que se necesite modificar la corriente en CA/CC o CC/CA. Esto hace que se esté investigando diferentes posibilidades de diseño para la red de distribución con las que dar solución al abastecimiento ante una mayor demanda energética.

Analizando los hábitos de consumo y generación actuales y futuros, este nuevo perfil energético hace que sea aconsejable evaluar la posibilidad de disponer de una distribución en CC, que anteriormente no se había planteado, dándole a la CC una nueva posibilidad de participar en la distribución de energía eléctrica en el ámbito de la BT. Esta distribución en CC serviría para alimentar de forma directa a baterías de VEs, así como para la conexión de la GD, eliminando la etapa de conversión CA/CC en todos estos equipos. Por ello, en un futuro próximo, sería importante que hubiera una instalación de CC en la mayoría de los hogares, dotándolos de una instalación más eficiente para estos nuevos tiempos que acontecen.

Ante esta nueva situación energética, y considerando las redes de distribución eléctricas existentes, este Trabajo Fin de Grado pretende evaluar una posible solución. Para ello, se comparan las redes de distribución actuales, las cuales contemplan exclusivamente la distribución en CA, con varias alternativas o escenarios donde se añade una red de distribución en CC, empleando una red similar a la mostrada en Figura 1-3, donde se destina la línea de CC para cargar los VEs y la de CA para las viviendas, obteniéndose así una red de distribución híbrida CA/CC.

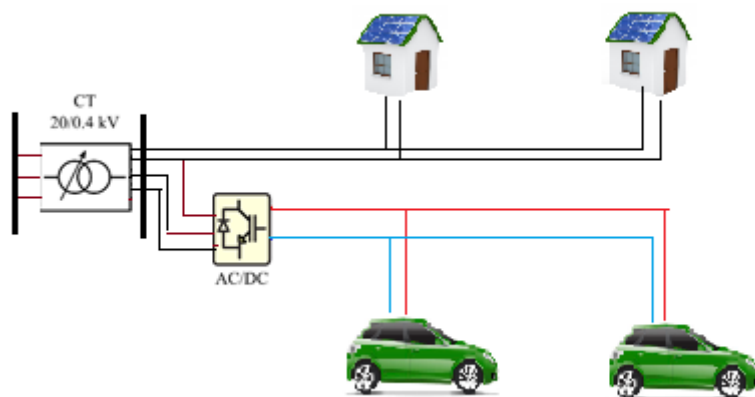


Figura 1-3. Ejemplo esquema de red de distribución BT híbrida para uso doméstico

Por último, es importante mencionar que este estudio forma parte del proyecto de investigación “Distribución eficiente de energía eléctrica en red de BT mediante redes mixtas CA/CC” [6] para dar respuesta al escenario planteado, llevado a cabo por un grupo de investigadores del Departamento de Ingeniería Eléctrica de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Sevilla.

1.1 Objetivos

En este Trabajo Fin de Grado se evalúa el comportamiento de diferentes configuraciones de redes de distribución en BT híbridas CA/CC viables para su explotación en el sistema actual y que conllevarían una modificación mínima de la estructura de la red de distribución actual. El análisis se realiza comparando las caídas de tensión en cada una de las redes híbridas propuestas con respecto a una red de distribución en BT convencional con CA, y entre las distintas alternativas de redes híbridas establecidas en este trabajo. Por lo tanto, en este trabajo se ponen de manifiesto las ventajas e inconvenientes entre diferentes configuraciones y escenarios posibles para la coexistencia de distribución en BT de tipo CC y CA. Este estudio se lleva a cabo analizando varios puntos de vista diferentes y complementarios a su vez, con la intención de contemplar toda la casuística posible, los cuales se resumen a continuación:

- Análisis de distintos casos de estudio en función de la configuración de la red de distribución. Este análisis contempla una distribución trifásica en CA más una distribución en CC o una distribución monofásica en CA más una distribución en CC.
- Análisis de diferentes escenarios de carga y generación para los casos de estudios. Se plantea para cada escenario distintos límites de consumo y generación, variando a su vez la distribución de las cargas y de la GD en cada escenario.

Todos estos escenarios y casos de estudio se detallan a lo largo del documento teniendo presente un equilibrio de cargas entre los casos monofásicos y trifásicos.

2 CONFIGURACIÓN DE LOS CASOS DE ESTUDIO

En este capítulo se van a desarrollar los diferentes casos de estudio diseñados para la implementación de las redes híbridas CA/CC en la red de distribución de BT. Con estos casos se pretende analizar las ventajas e inconvenientes que pueden presentar estas redes híbridas CA/CC en el panorama futuro de generación y consumo de energía eléctrica en el ámbito doméstico. Para ello se va a proponer una red de distribución en BT de CA, similar a la que actualmente hay en las viviendas, con dos posibles configuraciones de suministro, una monofásica y otra trifásica, pero siendo todas las cargas conectadas a ambas configuraciones de red viviendas de consumo monofásico.

Además, a las dos posibles configuraciones mencionadas anteriormente hay que añadirle la red de suministro en CC. Para ambos casos de estudio existen dos alternativas para la red de CC, la primera opción consiste en utilizar una sección de cable por fase menor a la que tiene la red de CA, atendiendo a un criterio térmico. La segunda opción plantea utilizar una sección de cable igual a la sección de la red de CA. Por tanto, esto hace un total de cuatro posibles casos de estudio para la configuración híbrida. Por otro lado, hay que considerar dos casos de estudio de la red CA convencional, adicionales a los anteriores, y con los cuales se compararán los resultados obtenidos en las configuraciones híbridas.

En definitiva, este documento contempla cuatro casos de estudio para redes híbridas y dos casos de estudio para redes CA convencionales como casos base. Todos estos casos de estudio serán sometidos posteriormente a diferentes escenarios, los cuales contemplan panoramas de carga y generación diferentes, y con los que se pretende someter a las diferentes configuraciones de cada caso de estudio a situaciones estresantes para comprobar su respuesta. A continuación, se detalla la red de distribución CA convencional elegida como banco de ensayos y todas las configuraciones propuestas.

2.1 Red de distribución CA elegida

La red de distribución CA en BT elegida como banco de ensayos, y la cual se utiliza para realizar todas las configuraciones presentadas en este proyecto, es la red de distribución CA de configuración doméstica propuesta por la Task Force C06.04.02 de CIGRÈ. En la Figura 2-1, se puede ver el esquema unifilar de la red de distribución de CIGRÈ, formada por cuatro hilos, las tres fases y el neutro, y por cinco nudos con cargas trifásicas. Estas cargas equivalen a la potencia demanda por las viviendas. Los parámetros que definen la red han sido aportados por CIGRÈ, quedando recogidos en la Tabla 2-1, no influyendo en estos valores la configuración de la red. Como se puede apreciar, la red esta constituida por una línea principal (UG1), formada por los tramos de línea que hay entre los nudos 2, 3, 4, 5, 6 y 7, teniendo esta línea una sección de cable mayor, 240 mm^2 , que la correspondiente a los tramos de línea secundarios (UG3), 50 mm^2 , que parten de UG1, acabando estos tramos en los nudos 8, 9, 10, 11 y 12, estando en cada uno de ellos las cargas de la red conectadas. En UG3 todos los tramos tienen la misma longitud exceptuando el que va al nudo 11 que tiene una longitud mayor con respecto a los demás.

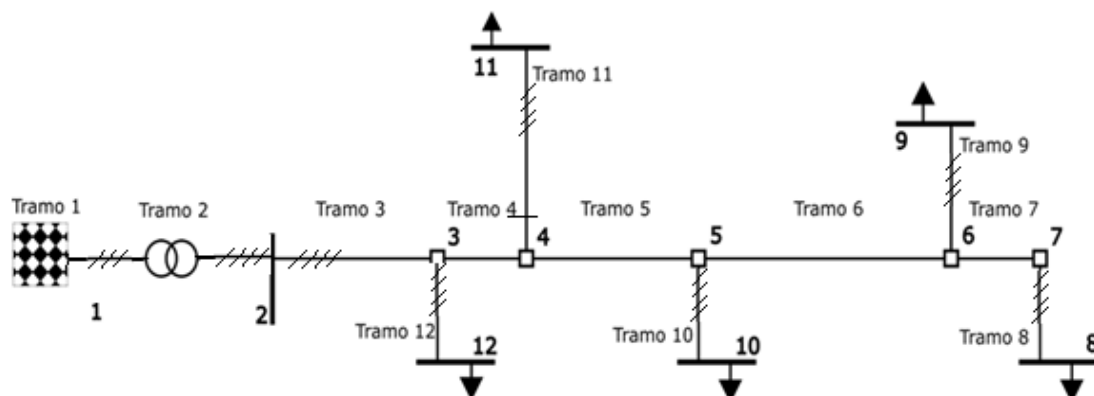


Figura 2-1. Red de distribución en BT de CA elegida

RED CA	Tramo	R (Ω)	L (H)	Longitud teórica tramo (km)
Línea Principal (UG1) 240 mm ²	2	0,0192	$0,0768/(100\pi)$	-
	3	0,0680	$0,0340/(100\pi)$	0,070
	4	0,0340	$0,0171/(100\pi)$	0,035
	5	0,0680	$0,0340/(100\pi)$	0,070
	6	0,1021	$0,0512/(100\pi)$	0,105
	7	0,0340	$0,0171/(100\pi)$	0,035
	Línea Secundaria (UG3) 50 mm ²	8	0,1480	$0,0154/(100\pi)$
9		0,1480	$0,0154/(100\pi)$	0,030
10		0,1480	$0,0154/(100\pi)$	0,030
11		0,5179	$0,0538/(100\pi)$	0,105
12		0,1480	$0,0154/(100\pi)$	0,030

Tabla 2-1. Datos red de distribución CA en BT elegida

Como se ha comentado anteriormente, en este documento se evalúa la posibilidad de realizar una distribución trifásica o monofásica de la red de CA convencional a la cual posteriormente se le añade la red de distribución con CC para crear la red híbrida. La red proporcionada por CIGRÉ es una red trifásica y por lo tanto está compuesta por tres cables de fase y uno de neutro con las especificaciones de la Tabla 2-1. En cuanto a la red monofásica utilizada en este documento, se han utilizado los mismos parámetros propuesto por CIGRÉ, pero en este caso, solo con un cable de fase y el cable de neutro. Además, en ambos casos se tiene el mismo esquema para la red, utilizándose por tanto en ambas situaciones los parámetros de la Tabla 2-1.

2.2 Caso monofásico (Caso 1)

El caso monofásico parte de la red de distribución BT doméstica trifásica actual, a la cual se le realizan modificaciones para poder obtener una red híbrida CA/CC. De los cuatro hilos por los que está constituida la red trifásica, se destinan dos para CA y dos para CC, habiendo dos alternativas para la red de CC, teniendo de este modo una red híbrida CA/CC, representada en la Figura 2-2, donde las líneas negras representan la red de CA y la línea roja y azul representan la red de CC. Con esta configuración de red de distribución, la red de CA tiene un suministro monofásico, y por lo tanto, todas las cargas conectadas a ella solo pueden ser monofásica, creando así una diferencia notable con respecto a la red de distribución convencional.

La red de CC tiene el mismo esquema que la red CA mostrado anteriormente, Figura 2-1, manteniendo el mismo número de nudos y misma longitud del cable en cada tramo que hay entre los nudos, independientemente de la sección de cable que haya en cada configuración de la red de CC.

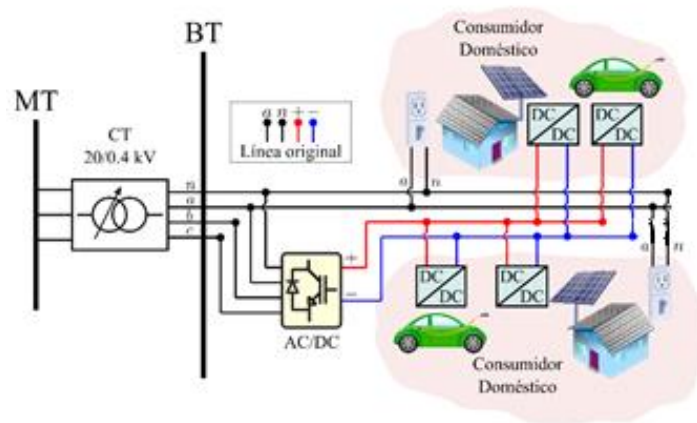


Figura 2-2. Ejemplo red híbrida CA/CC siendo la red de CA monofásica

A continuación se define las dos configuraciones de la red CC para la configuración monofásica en función de la sección del cable de CC.

2.2.1 Configuración 1 de la red de CC para el caso monofásico

La configuración 1 de la red de CC considera la sección del cable de CC de un tamaño menor al que se utiliza para la red CA. El cálculo de dicha sección se ha obtenido utilizando un criterio térmico en el cual se ha llevado al aislante del cable a su máxima temperatura para una intensidad dada e igual en ambas redes, CA y CC. La obtención de esta sección no ha sido objeto de este proyecto y se ha utilizado de trabajos previos al mismo. En la Figura 2-3 se muestra un dígrama de temperaturas obtenido en la red híbrida y con el cual se obtuvo la sección del cable CC. En dicha figura, los dos cables con mayor sección corresponden a la red de CA y los dos de menor sección a la red CC. Las secciones obtenidas para cada tramo de la red CC son de 70 mm² para el tramo de UG1 y 16 mm² en los tramos de UG3. Para esta configuración de la red de CC los valores de resistencia y longitud del cable por cada tramo de la red son los recogidos en la Tabla 2-2.

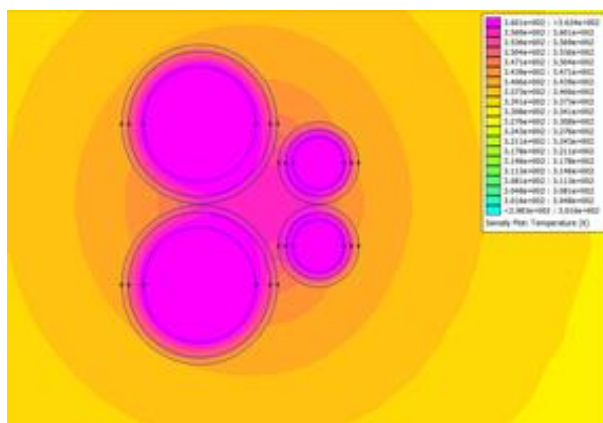


Figura 2-3. Configuración 1 de la red de CC para red híbrida CA/CC caso monofásico

RED CC CONFIGURACIÓN 1	Tramo	R (Ω)	Longitud teórica tramo (km)
Línea Principal (UG1) 70 mm ²	3	0,2386	0,070
	4	0,1193	0,035
	5	0,2386	0,070
	6	0,3578	0,105
	7	0,1193	0,035
Línea Secundaria (UG3) 16 mm ²	8	0,1022	0,030
	9	0,1022	0,030
	10	0,1022	0,030
	11	0,3578	0,105
	12	0,1022	0,030

Tabla 2-2. Datos configuración 1 de la red de distribución CC en BT

2.2.2 Configuración 2 de la red de CC para el caso monofásico

En la segunda configuración de la red de CC el cable tiene la misma sección que la red de CA, dado que la idea principal es utilizar la misma instalación existente, y por lo tanto, no es necesario inversión en tendido eléctrico. En la Figura 2-4 se puede observar que los cuatro hilos del caso monofásico tienen una sección similar, teniendo dos de ellos CA y los otros dos CC. La resistencia que presenta el cable en cada tramo de la configuración 2 de la red de CC es la reflejada en la Tabla 2-3. En esta figura se puede observar que la temperatura de todos los cables es similar, esto se debe a que se ha calculado la potencia máxima que se puede transportar por la red CC dada una sección, planteando así la posibilidad de aprovechar toda la capacidad de dicha red de CC.

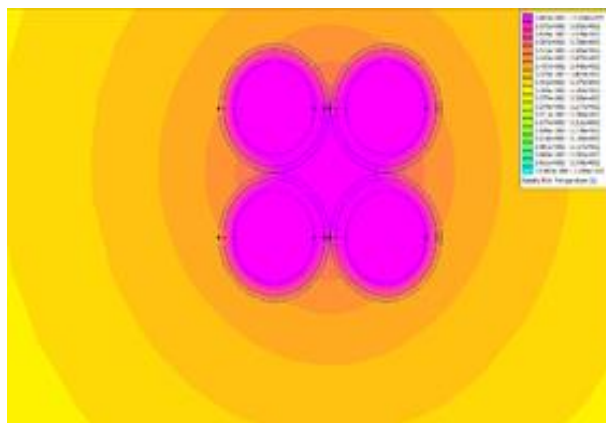


Figura 2-4. Configuración 2 de la red de CC para red híbrida CA/CC caso monofásico

RED CC CONFIGURACIÓN 2	Tramo	R (Ω)	Longitud teórica tramo (km)
Línea Principal (UG1) $R_{70 X} = R_{240}$	3	0,0952	0,070
	4	0,0476	0,035
	5	0,0952	0,070
	6	0,1428	0,105
	7	0,0476	0,035
Línea Secundaria (UG3) DC $R_{16 X} = R_{50}$	8	0,0408	0,030
	9	0,0408	0,030
	10	0,0408	0,030
	11	0,1428	0,105
	12	0,0408	0,030

Tabla 2-3. Datos configuración 2 de la red de distribución CC en BT

2.3 Caso trifásico (Caso2)

En este caso de estudio, al igual que en el caso monofásico, se parte de una red de distribución trifásica en BT, la cual consta de cuatro hilos. En esta configuración no se aplica ningún cambio a la red de distribución trifásica en CA, y por lo tanto, para crear la red híbrida es necesario añadir una nueva red, en este caso de CC, la cual consta de dos nuevos cables; teniendo así una red híbrida CA/CC con seis hilos, como se muestra en la de la Figura 2-5, donde las líneas negras representan la red de CA y las líneas roja y azul representan la red de CC. De esta manera se mantiene el suministro trifásico de la red de CA. Hay que mencionar que en este caso solo se han contemplado cargas monofásicas, aumentando por tres la potencia en comparación con el caso monofásico o una carga trifásica acumulada. De esta forma, se podrán comparar más adelante los dos casos, tanto el trifásico como el monofásico, porque la red de CA/CC en ambos casos tienen las mismas características en cuanto a

cargas y características del cable de red, utilizándose en la red de CA los parámetros de la Tabla 2-1 también empleados en el caso monofásico.

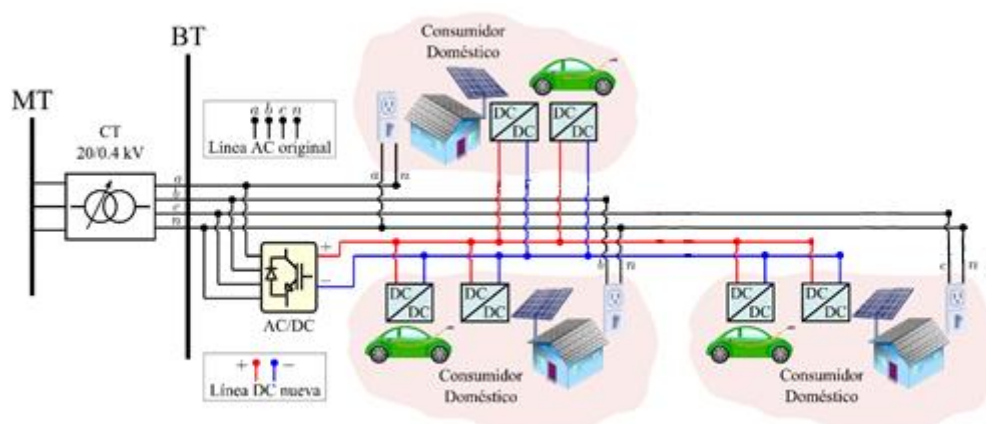


Figura 2-5. Ejemplo red híbrida CA/CC siendo la red de CA trifásica

A continuación se define las dos configuraciones de la red CC para la configuración monofásica en función de la sección del cable de CC.

2.3.1 Configuración 1 de la red de CC para el caso trifásico

En la primera configuración de la red de CC el cable tiene una sección menor que la red de CA, al igual que en el caso de monofásica y habiéndose calculado por el mismo procedimiento. Por lo tanto, la sección de los tramos UG1 para la red de CC es de 70 mm² y de 16 mm² para los tramos de UG3, tomando los mismos valores de resistencia el cable de CC mostrados en la Tabla 2-2. En la Figura 2-6 se puede ver los cuatro hilos de mayor sección que corresponden a la red de CA y los dos restantes de menor sección pertenecientes a la red de CC. Además se puede apreciar como uno de los cables de la red de CA presenta una temperatura muy inferior, esto se debe a que es el cable de neutro y en este estudio se considera un suministro equilibrado.

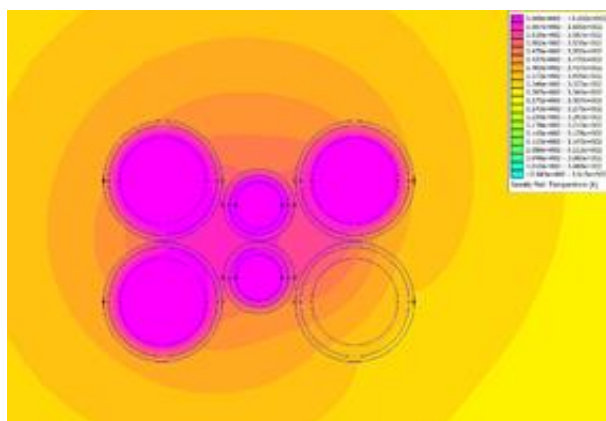


Figura 2-6. Configuración 1 de la red CC para red híbrida CA/CC caso trifásico

2.3.2 Configuración 2 de la red de CC para el caso trifásico

En la segunda alternativa para la red de CC, el cable de CC tiene la misma sección que la red de CA, como se puede apreciar en la Figura 2-7. Los cables son los mismo que en la configuración 2 del caso monofásico, utilizándose por tanto la misma tabla de valores que antes, Tabla 2-3. Al igual que en el caso anterior, se puede apreciar como uno de los cables tiene una temperatura muy inferior, siendo este el cable de neutro.

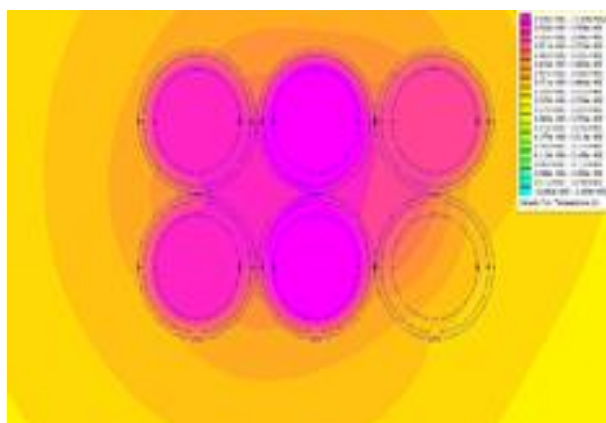


Figura 2-7. Configuración 2 de la red CC para red híbrida CA/CC caso trifásico

3 ESCENARIOS DE ESTUDIO

En este capítulo se presentan los escenarios que se van a estudiar en este proyecto en función del tipo de suministro que tenga la red de distribución, el conjunto y tipo de cargas o la generación renovable. Del conjunto total de escenarios diseñados, tres de ellos van a estar formados únicamente por una red de distribución con CA mientras que los restantes van a estar constituidos por redes híbridas CA/CC. En total se han diseñado seis escenarios que se van a aplicar a cada caso de estudio, comentados anteriormente.

Para la creación de los diferentes escenarios la carga que se demanda en cada nudo se asume como una carga concentrada al final de línea, siendo siempre esta monofásica, pero con valores distintos en función de si se estudia el caso trifásico o monofásico, por lo que se tiene que hacer distinción entre ambos casos dentro de cada escenario.

Con estos escenarios se pretende abarcar toda la casuística posible dentro de los posibles hábitos de consumo futuro y poner de manifiesto las ventajas e inconvenientes que aportarían las redes híbridas en la red de distribución BT. A continuación se detallan los escenarios diseñados:

3.1 Escenario 0: Red de distribución CA en BT actual

Actualmente las redes de distribución doméstica existentes sólo contemplan una distribución en CA, pues hasta ahora no es habitual distribuir otro tipo de corriente, habiendo situaciones habituales en las que se coloca un rectificador en los equipos que tienen un suministro interno en CC, como pueden ser los aires acondicionados. Por ello el primer escenario diseñado, denominado escenario 0, es un escenario que representa la situación actual de consumos en las viviendas.

Para poder aplicar este escenario 0 a los casos de estudio, comentados anteriormente, hay que hacer distinción entre una red de distribución monofásica o trifásica, dado que, al colocar al final de cada línea secundaria de suministro cargas monofásicas equivalentes a la de una vivienda, hay que equilibrar la potencia de las cargas para poder realizar un estudio comparativo adecuado. En las Figura 3-1 y Figura 3-2 se puede ver la diferencia entre el suministro trifásico o monofásico y la alimentación a las diferentes viviendas. Hay que destacar que en este escenario no se contempla la carga de VE o la integración de GD, siendo todavía habitual esta situación aunque las tendencias están cambiando rápidamente.

En la Figura 3-1 se puede apreciar el caso monofásico con cargas al final de cada línea, siendo esta carga la equivalente a la de una vivienda, a excepción de los nudos 10 y 12, en los que se consideran que hay dos viviendas conectadas en cada toma. Esta configuración del caso monofásico, hace que para el caso trifásico, como se desea mantener una distribución de cargas equivalentes, haya en cada final de línea el triple de cargas monofásicas equivalentes a las de una vivienda que en el caso monofásico, como se puede observar en la Figura 3-2, colocándose tres viviendas en los nudos 8, 9 y 11, y seis viviendas en los otros dos nudos restantes.

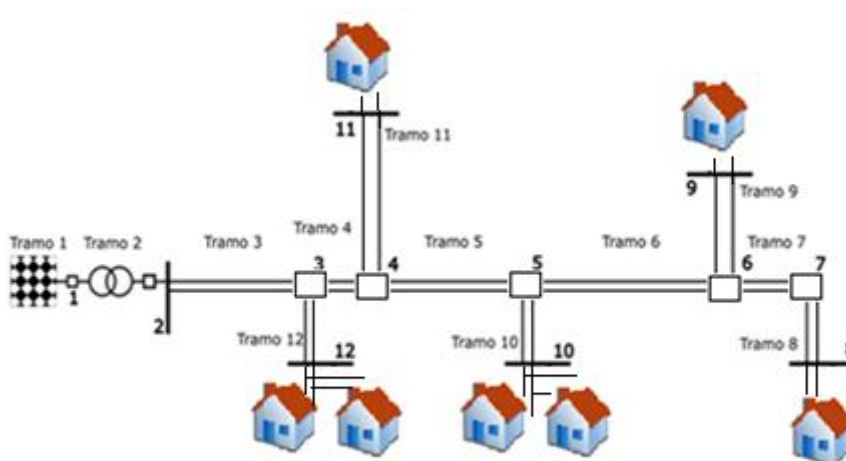


Figura 3-1. Red de distribución en BT actual en CA para el caso monofásico

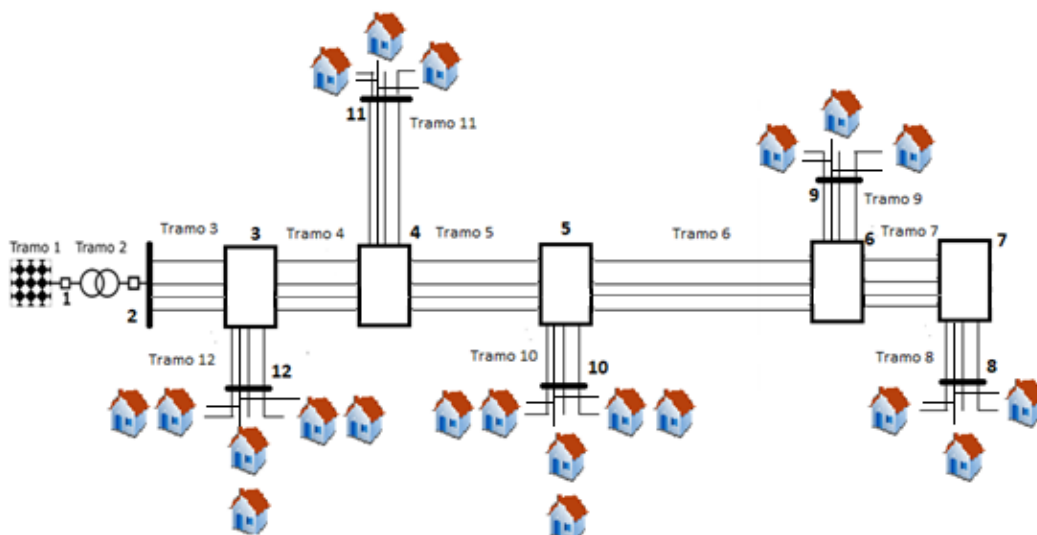


Figura 3-2. Red de distribución en BT actual en CA para el caso trifásico

Para determinar la carga monofásica demandada por cada vivienda, se ha estimado la potencia media instalada de una vivienda partiendo del Reglamento de Baja Tensión (REBT) [6], eligiéndose una potencia de 3450 W para cada vivienda. Como se desea que prácticamente sean idénticas las redes de CA del caso trifásico y la del caso monofásico, para así posteriormente poder comparar los resultados obtenidos para cada una tras la simulación, se determina para las dos posibilidades la misma potencia por vivienda en cada fase. Además, se le aplica a la potencia instalada un factor de simultaneidad en función del número de viviendas que hay en cada nodo, también recogido en la ITC-BT-10, [7], para que así sean más realistas los resultados obtenidos tras la simulación, junto con un factor de potencia de 0,95 ya que no se quiere estudiar el caso ideal, de modo que haya potencia activa y potencia reactiva en la red de CA, característico de una red de distribución en BT real. Estos dos parámetros se aplican en todos los escenarios, manteniéndose el mismo factor de potencia pero variando el coeficiente de simultaneidad en los siguientes escenarios que se van a plantear.

Para este escenario y todos los siguientes, se van a colocar en los nudos 12 y 10 dos viviendas en

monofásica y seis en el caso trifásico, siendo el triple del caso monofásico y manteniendo así el equilibrio de cargas. En cambio, en los nudos 8, 9 y 11 se pondrán una vivienda en monofásica y tres viviendas en trifásica. Estos valores quedan recogidos para el caso monofásico en la Tabla 3-1 mientras que para el caso trifásico están reflejados en la

RED CA ACTUAL CASO TRIFÁSICO	Nudo 12	Nudo 11	Nudo 10	Nudo 9	Nudo 8
Nº de viviendas	6	3	6	3	3
Potencia instalada total (kW)	18,63	10,35	18,63	10,35	10,35

Tabla 3-2. De esta forma, siempre hay el mismo número de viviendas por fase, siendo el coeficiente de simultaneidad de 1 por casa cuando hay tres o menos casas en un mismo nudo, y un coeficiente de simultaneidad de 0,9 por hogar cuando hay seis viviendas en una misma toma.

RED CA ACTUAL CASO MONOFÁSICO	Nudo 12	Nudo 11	Nudo 10	Nudo 9	Nudo 8
Nº de viviendas	2	1	2	1	1
Potencia instalada total (kW)	6,90	3,45	6,90	3,45	3,45

Tabla 3-1. Potencia por nudo en red de distribución en BT actual para el caso monofásico

RED CA ACTUAL CASO TRIFÁSICO	Nudo 12	Nudo 11	Nudo 10	Nudo 9	Nudo 8
Nº de viviendas	6	3	6	3	3
Potencia instalada total (kW)	18,63	10,35	18,63	10,35	10,35

Tabla 3-2. Potencia por nudo en red de distribución en BT actual para el caso trifásico

3.2 Escenario 1: Red de distribución CA en BT con carga habitual y VE conjuntamente (sin red CC)

En el escenario 1 se tiene una red de distribución en BT con suministro en CA como la comentada en el escenario 0. La diferencia principal entre este escenario y el escenario 0 reside en la carga demandada por los VEs, integrados como un hábito de consumo habitual en este escenario, y los consumos habituales de CA en viviendas de forma conjunta. Hay que destacar que todo el consumo mencionado se realiza mediante el suministro en CA, hecho que es importante puesto que la red de CA que existe hoy en día no se diseñó para soportar y aportar tal cantidad de energía eléctrica a la vez, manteniendo un suministro seguro y de calidad, ya que, esta situación podría generar grandes caídas de tensión con un suministro eléctrico discontinuo en algunos momentos. Por lo tanto, con este escenario 1 se pretende ver si se satura la red con el nuevo perfil energético que se está produciendo en la sociedad.

En este escenario y en los siguientes, por cada vivienda se considera que hay un VE, por tanto, en este

escenario, la carga demandada en cada nudo se duplica ya que se mantiene la potencia instalada de 3,45 kW para las viviendas y se le añade 3,68 kW por VE, obteniéndose la potencia instalada para los VEs de la ITC-BT-52 [8], haciendo esto un total de 7130 W a contratar. Según el BOE núm.231 de 2006 [9], que regula la potencia a contratar por las viviendas, no hay ningún valor idéntico al que se requiere, teniendo que elegir entre 6,9 kW o 8,05 kW. Si se compara la potencia que se desea con la que se puede contratar, la que más se aproxima es 6,9 kW pues sólo faltaría 230 W. Por consiguiente, en la red de CA cuando hay VE y vivienda en el mismo nudo, se coloca una potencia instalada de 6,9 kW, recogida en la Tabla 3-3 los valores de potencia instalada para el caso monofásico y en la Tabla 3-4 para el caso trifásico.

RED CA VIVIENDA+VE CASO MONOFÁSICO	Nudo 12	Nudo 11	Nudo 10	Nudo 9	Nudo 8
Nº de viviendas	2	1	2	1	1
Nº de vehículos eléctricos	2	1	2	1	1
Potencia instalada total (kW)	13,80	6,90	13,80	6,90	6,90

Tabla 3-3. Potencia por nudo en red CA con vivienda y VE para el caso monofásico

RED CA VIVIENDA+VE CASO TRIFÁSICO	Nudo 12	Nudo 11	Nudo 10	Nudo 9	Nudo 8
Nº de viviendas	6	3	6	3	3
Nº de vehículos	6	3	6	3	3
Potencia instalada total (kW)	37,26	20,70	37,26	20,70	20,70

Tabla 3-4. Potencia por nudo en red de CA con vivienda y VE para el caso trifásico

La distribución de las viviendas a lo largo de la red de CA es la misma que en el escenario 0, posicionándose los VEs de igual modo que las viviendas en la red de CA, como se puede ver en la Figura 3-3 para el caso monofásico y en la Figura 3-4 para el caso trifásico, para así tener la misma base con la que comparar los resultados obtenidos en los distintos escenarios.

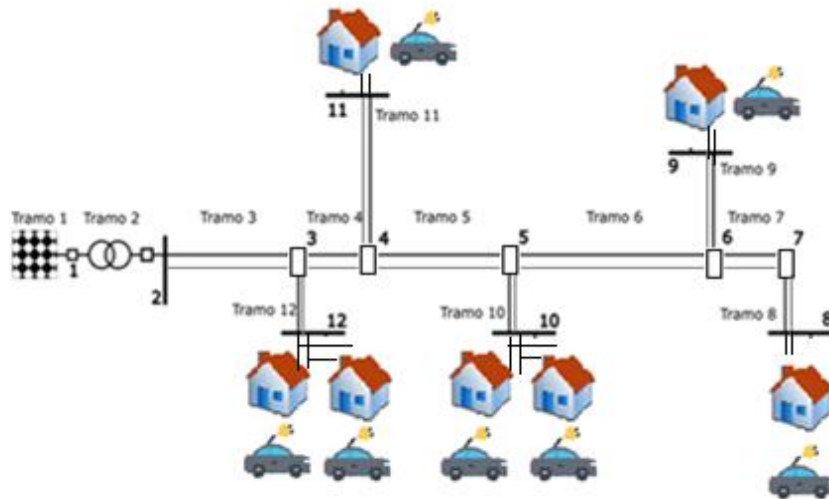


Figura 3-3. Red CA con vivienda junto con VE para el caso monofásico

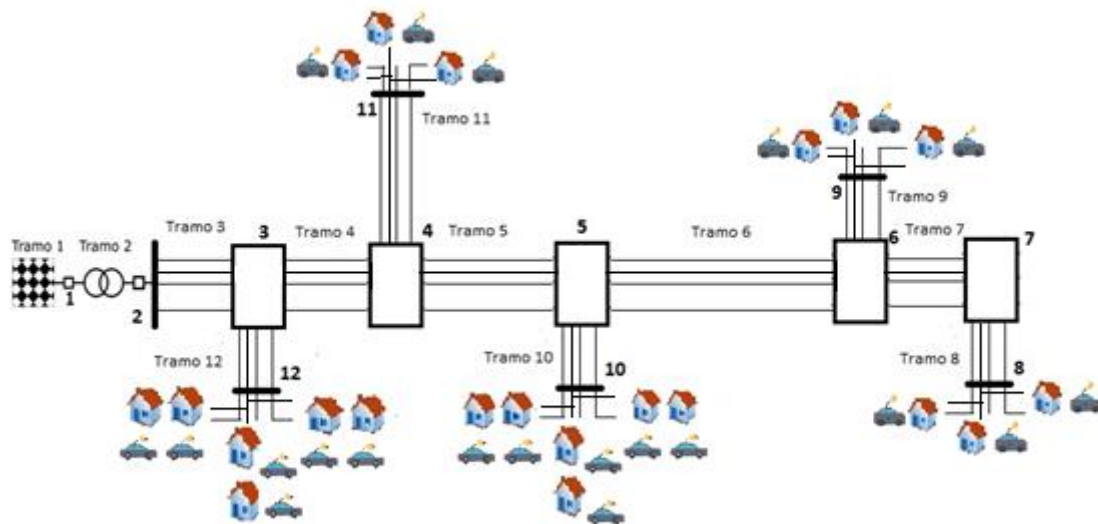


Figura 3-4. Red CA con vivienda junto con VE para el caso trifásico

3.3 Escenario 2: Red de distribución en CA con carga habitual, VE y GD conjuntamente (sin red CC)

En el escenario 2 se considera la red de CA con las mismas características que en el escenario 1, con la carga habitual de una vivienda y VE en el mismo nudo, tanto para el caso monofásico como para el caso trifásico, aunque a diferencia del anterior, se le incorpora GD para comprobar si esta situación es más beneficiosa que la anterior. Además, se pretende comprobar, si con la GD se evitaría que se saturase la red de distribución en BT de CA actual con la potencia que debe suministrar en cada toma puesto que no toda la potencia tendría que ser suministrada por la red eléctrica al ser una parte aportada por la GD.

Para calcular cuánta potencia máxima podría dar la GD a la red, se estima una vivienda media de 100

m² y unos paneles fotovoltaicos de 30 W/m² cada uno, lo que hace que la GD pueda generar como máximo 3 kW para la superficie que se ha considerado, valor que se ha tomado como fijo porque no se ha hecho distinción por hora, por zona climática ni por época del año. Esto hace que los parámetros utilizados como potencia instalada en el escenario 2 sean los recogidos en la Tabla 3-5 para el caso monofásico y el de la Tabla 3-6 para el caso trifásico.

RED CA VIVIENDA+VE+GD CASO MONOFÁSICO	Nudo 12	Nudo 11	Nudo 10	Nudo 9	Nudo 8
Nº de viviendas	2	1	2	1	1
Nº de vehículos eléctricos	2	1	2	1	1
Nº de viviendas con GD	2	1	2	1	1
Potencia instalada total (kW)	7,80	3,90	7,80	3,90	3,90

Tabla 3-5. Potencia por nudo en red CA con vivienda, VE y GD para el caso monofásico

RED CA VIVIENDA+VE+GD CASO TRIFÁSICO	Nudo 12	Nudo 11	Nudo 10	Nudo 9	Nudo 8
Nº de viviendas	6	3	6	3	3
Nº de vehículos	6	3	6	3	3
Nº de viviendas con GD	6	3	6	3	3
Potencia instalada total (W)	19,26	11,70	19,26	11,70	11,70

Tabla 3-6. Potencia por nudo en red CA con vivienda, VE y GD para el caso trifásico

3.4 Escenario 3: Red híbrida CA/CC con vivienda en la red CA y VE en la red CC

El escenario 3 es el primer escenario donde se considera la red híbrida CA/CC, y por lo tanto, coexisten la red de distribución CA habitual y la red CC propuesta. En los escenarios que contemplan las redes híbridas hay que distinguir que tipo de carga o generación está conectada a cada red. En este caso concreto, en la red de CA únicamente se contempla la carga demandada por las viviendas mientras que en la red de CC se posiciona la potencia que necesitan los VEs para recargarse. Esto permite que ante la nueva situación energética que se está presentando en el mundo se pueda buscar una solución sin necesidad de saturar la red de distribución en BT de CA puesto que esta no ha sido diseñada para tales cantidades de energía. Hay que aclarar que en este escenario las viviendas no disponen de GD.

La red de CA tiene la misma disposición que la red de distribución en BT que hoy en día existe, siguiendo para el caso monofásico el esquema de la Figura 3-1 y para el caso trifásico el de la Figura 3-2. Los parámetros de la red de CA, tanto para monofásica como para trifásica, son idénticos a los recogidos anteriormente en la Tabla 3-1 y en la Tabla 3-2.

La red de CC al aportar únicamente la carga de los VEs sin tener en cuenta la de las viviendas, se determina por cada VE una potencia instalada de 3,68 kW definida por la ITC-BT-52 [8] y en cada nudo se coloca un VE por cada vivienda que hay en la red de CA en esa misma toma, como se demuestra en la Figura 3-5 para el caso monofásico, que representa la distribución de las cargas en la red híbrida, siendo la línea roja la red de CC de dos hilos para los VEs y la línea negra la red de CA de dos hilos para las viviendas. Para el caso trifásico, la distribución de la red híbrida CA/CC sería similar a la expuesta en la Figura 3-5 pero posicionándose en cada nudo el triple de cargas que en el caso monofásico. Los valores de potencia instalada para la red de CC quedan recogidos en la Tabla 3-7 para el caso monofásico y en la Tabla 3-8 para el caso trifásico.

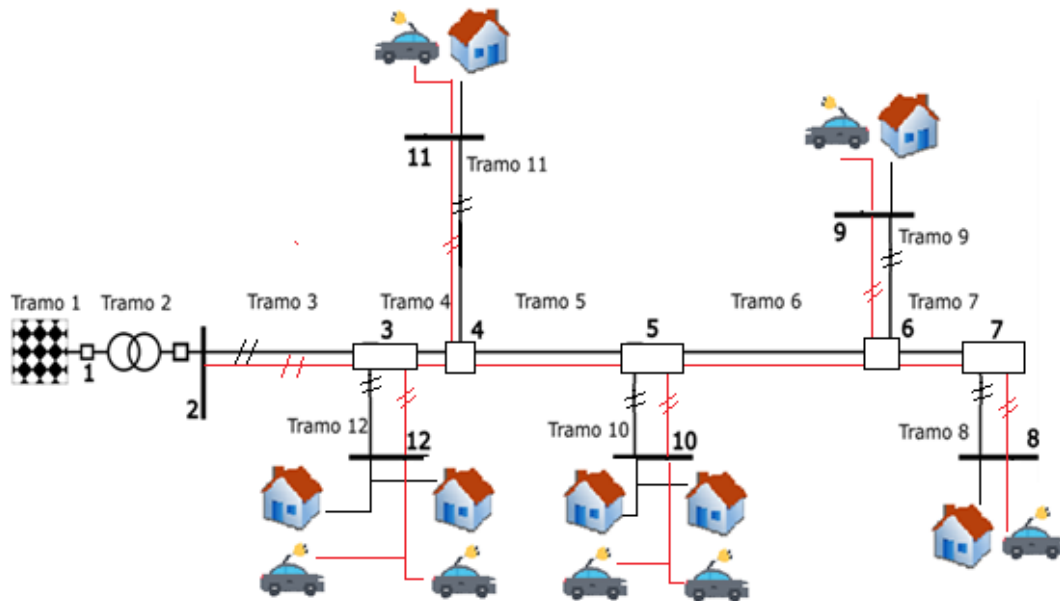


Figura 3-5. Red híbrida CA/CC con VE en red CC y vivienda en red CA para el caso monofásico

RED CC VE CASO MONOFÁSICO	Nudo 12	Nudo 11	Nudo 10	Nudo 9	Nudo 8
Nº de vehículos eléctricos	2	1	2	1	1
Potencia instalada total (W)	7.360	3.680	7.360	3.680	3.680

Tabla 3-7. Potencia por nudo en red CC con VE para el caso monofásico

RED CC VE CASO TRIFÁSICO	Nudo 12	Nudo 11	Nudo 10	Nudo 9	Nudo 8
Nº de vehículos eléctricos	6	3	6	3	3
Potencia instalada total (W)	22.080	11.040	22.080	11.040	11.040

Tabla 3-8. Potencia por nudo en red CC con VE para el caso trifásico

A pesar de que para la red de CC hay dos alternativas en función de la sección del cable, esto no afecta para definir la carga que hay en cada nudo por lo que se emplean las mismas tablas de valores de potencia instalada para las dos configuraciones de la red de CC en todos los escenarios a estudio que haya red de CC.

3.5 Escenario 4: Red híbrida CA/CC con vivienda junto con GD en la red CA y VE en la red CC

En el escenario 4 se considera una red híbrida CA/CC habiendo en la red de CC la carga equivalente a la de un VE en cada nudo mientras que en la red de CA la carga que tiene es la de una vivienda con GD, lo que la diferencia del escenario 3. Esto significa que en la red de CC se emplean los mismos parámetros de potencia en cada nudo recogidos en la Tabla 3-7 en monofásica y en la Tabla 3-8 en trifásica, manteniendo el esquema de red de CC de la Figura 3-5 en monofásica y de la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** en trifásica del escenario 3.

En la red de CA al introducirle GD, en el caso de que el aporte de está sea el máximo, la red eléctrica sólo tendría que aportar para el caso monofásico la potencia de la Tabla 3-9 y para el caso trifásico la potencia mostrada en la Tabla 3-10, ya que se ha determinado que existe GD en cada una de las viviendas, siguiendo la red de CA el mismo esquema para monofásica de la Figura 3-1 y para trifásica de la Figura 3-2 que la red de de distribución en BT con CA que actualmente hay en las casas.

RED CA VIVIENDA+GD CASO MONOFÁSICO	Nudo 12	Nudo 11	Nudo 10	Nudo 9	Nudo 8
Nº de viviendas	2	1	2	1	1
Nº de viviendas con GD	2	1	2	1	1
Potencia instalada total (W)	900	450	900	450	450

Tabla 3-9. Potencia por nudo en red de CA con vivienda y GD para el caso monofásico

RED CA VIVIENDA+GD CASO TRIFÁSICO	Nudo 12	Nudo 11	Nudo 10	Nudo 9	Nudo 8
Nº de viviendas	6	3	6	3	3
Nº de viviendas con GD	6	3	6	3	3
Potencia instalada total (W)	630	1.350	630	1.350	1.350

Tabla 3-10. Potencia por nudo en red de CA con vivienda y GD para el caso trifásico

3.6 Escenario 5: Red híbrida CA/CC con vivienda en la red CA y VE junto con GD en la red CC

En el escenario 5 se toma una red híbrida CA/CC, al igual que en los escenarios 3 y 4, teniendo el escenario 5 en común con el escenario 3 la red de CA ya que únicamente tiene la carga de las viviendas,

siendo la red de CA la misma que hay ahora en las casas. En cambio, en la red de CC del escenario 5, se encuentra la carga de los VEs junto con la GD, descargándose de esta forma la red de CC, lo que permitiría en caso de que sea necesario introducirle más carga sin verse perjudicado la calidad del suministro.

Tanto para la red de CA como para la red de CC se utilizan los mismos esquemas de red para el caso monofásico y trifásico que en el escenario 3, e incluso la red de CA tiene la misma potencia instalada en cada nudo. La diferencia radica en la potencia que tiene que aportar la red eléctrica a la red de CC al tener esta GD, teniendo los valores de potencia recogidos en la Tabla 3-11 para el caso monofásico y los de la Tabla 3-12 para el caso trifásico.

RED CC VE+GD CASO MONOFÁSICO	Nudo 12	Nudo 11	Nudo 10	Nudo 9	Nudo 8
Nº de vehículos eléctricos	2	1	2	1	1
Nº de viviendas con GD	2	1	2	1	1
Potencia instalada total (W)	1.360	680	1.360	680	680

Tabla 3-11. Potencia por nudo en red de CC con VE y GD para el caso monofásico

RED CC VE+GD CASO TRIFÁSICO	Nudo 12	Nudo 11	Nudo 10	Nudo 9	Nudo 8
Nº de vehículos eléctricos	6	3	6	3	3
Nº de viviendas con GD	6	3	6	3	3
Potencia instalada total (W)	4.080	2.040	4.080	2.040	2.040

Tabla 3-12. Potencia por nudo en red de CC con VE y GD para el caso trifásico

4 MODELOS DE ESTUDIO EN SIMULINK

En este capítulo se va a explicar cómo se han planteado los diferentes casos de estudio para su resolución, existiendo entre los casos diferencias y similitudes en el diseño de la red híbrida CA/CC. Debido a esto, se va a hacer primero distinción entre la red de CA y la red de CC, para posteriormente, exponer dentro de estas las diferencias y semejanzas entre el caso monofásico y el caso trifásico. Para ello se va a usar el programa informático con software matemático MATLAB, concretamente dentro de este se empleará la herramienta de Simulink.

4.1 Simulink

MATLAB es un programa informático con lenguaje propio que trabaja con vectores y matrices porque tiene un software matemático. Debido a esto se suele utilizar en investigaciones ya sea a nivel universitario o en centros específicos de investigación. MATLAB está constituido por diferentes elementos, agrupándose en dos grandes bloques, Simulink y GUIDE, que hacen que el programa sea completo, pues permite abarcar más campos de estudios con los elementos que hay en cada uno de los bloques. Este trabajo se ha realizado con Simulink, por lo que es la base de este estudio.

Simulink es una extensión de MATLAB que emplea una programación visual con la cual se puede obtener una simulación del comportamiento de los sistemas dinámicos, de esta forma se puede tener una idea de cómo actuarán estos sistemas en la realidad. Para programar en Simulink existen una serie de bloques, en función del ámbito que se desea estudiar, con los que diseñar el circuito de estudio. En este trabajo se ha usado el bloque de Simscape y dentro de él los elementos de Simpower System para montar la red híbrida de CA/CC puesto que da una visión de cómo sería físicamente la red eléctrica.

4.2 Red con CA

La red con CA de la red híbrida CA/CC tiene unas características comunes en el momento de diseñarla en monofásica y en trifásica. Así que primero se va a exponer los elementos comunes de la red de CA en ambos casos y posteriormente las características que hacen que se diferencie la red de CA del caso monofásico con la del caso trifásico.

4.2.1 Similitudes entre el caso monofásico y el caso trifásico

La red de CA parte de un transformador, tanto en el caso monofásico como en el caso trifásico, encargándose este de pasar los 20 kV que se tiene en la parte de MT a 400 V en BT, siendo $400/\sqrt{3}$ la tensión que va por cada fase, es decir, 230 V por fase. El transformador es Dy11 con fuente de alimentación trifásica, que es el que está en el laboratorio del departamento de Ingeniería Eléctrica de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería (ETSI) de Sevilla, con la intención de que al simular la red eléctrica que se ha planteado, el resultado que se obtenga sea lo más parecido posible a una red real.

A continuación del transformador se tiene un convertidor para obtener una red con CC que se explicará más adelante y la red de CA, la cual consta de una línea principal y unas líneas secundarias. La sección del cable de UG1 es mayor que la de UG3 pero no varía con la fuente de alimentación, por lo que, se utilizan los mismos parámetros de resistencia e inductancia en monofásica y en trifásica para el cable, expuestos anteriormente en el capítulo 2 los valores que lo definen.

En cuando a los nudos de la red con CA hay el mismo número y disposición en ambos casos,

dividiéndose los nudos de UG1 en dos, de esta manera una parte de la corriente sigue para el siguiente nudo de la línea principal y otra parte va a la toma de conexión donde se encuentran las cargas de una vivienda, a excepción del nudo 7, que es el último nudo de UG1, encontrándose en serie con el nudo 8 de UG3. Más adelante en la Figura 4-4 y en la Figura 4-5 se podrá observar la disposición de los nudos en ambos casos.

Para asegurar el correcto funcionamiento de la red, se coloca elementos en los nudos de la red de CA con los que medir la tensión e intensidad de salida de los finales de línea y del nudo de cabeza de la red de CA para ambos casos de estudio, con los que poder realizar los cálculos necesarios para calcular la caída de tensión y pérdidas de potencia generadas en la línea, recogido estos valores en el apartado Anexo.

4.2.2 Diferencias entre el caso monofásico y el caso trifásico

A pesar de que el caso monofásico y el caso trifásico tienen bastantes características en común, también tienen algunas diferencias en la configuración, puesto que, en trifásica hay tres fases mientras que en monofásica solamente una, esto hace que la red de CA con trifásica pueda contener más cargas monofásicas en total que la red de CA con monofásica, ya que, contiene las mismas cargas que hay en el caso monofásico por cada fase pero triplicado, como se puede ver en la Figura 4-1 que representa un nudo de final de línea de la red de CA con fuente de alimentación monofásica, mientras que en la Figura 4-2 se representa el mismo nudo pero corresponde a la red de CA del caso trifásico, pudiéndose observar que en ambas situaciones por fase hay únicamente una carga, mientras que, si se suman hay la carga de tres viviendas en trifásica y la de una vivienda en monofásica.

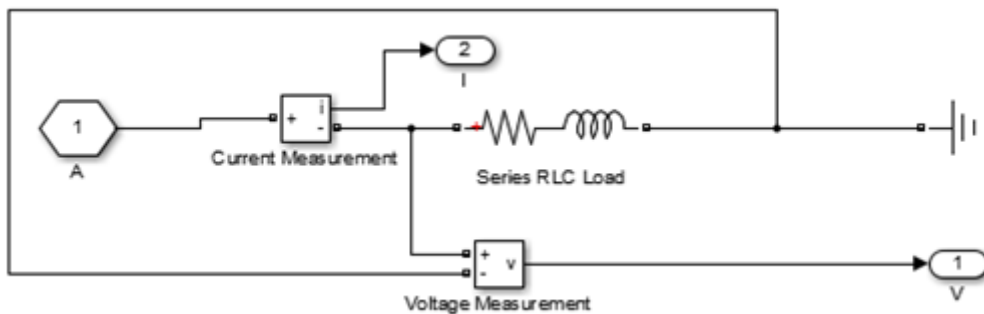


Figura 4-1. Nudo 11 de la red con CA en el caso monofásico

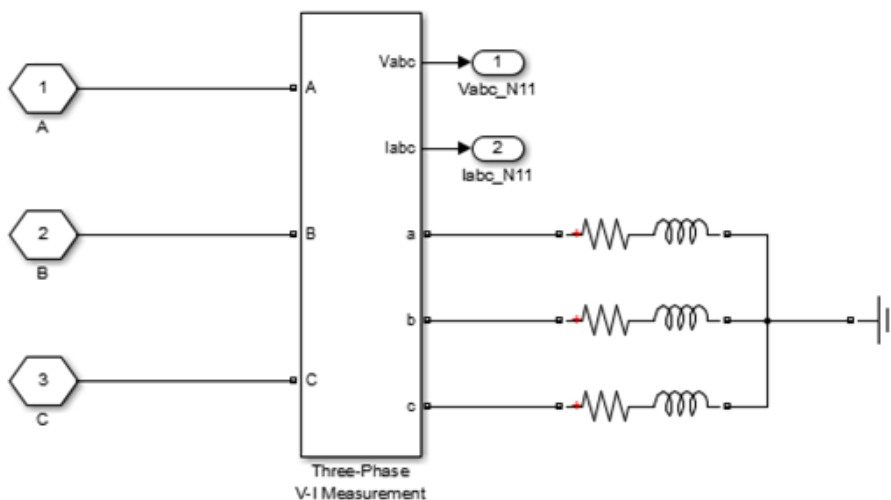


Figura 4-2. Nudo 11 de la red con CA en el caso trifásico

Por otra parte, el transformador tiene una fuente de alimentación trifásica, lo que supone que para el caso monofásico se tengan que cortar dos fases para así poder tener suministro monofásico en la red de CA, mientras que para el caso trifásico no se necesita cortar ninguna fase. Para cortar dos fases a la salida del transformador, lo que se hace es poner unas resistencias grandes, del orden de $10^5 \Omega$, dejando una fase para alimentar la red de CA a 230V, como se ve en la Figura 4-3. En cambio, cuando el suministro de la red de CA es en trifásica, la red que sale del transformador es una continuación de la red de CA.

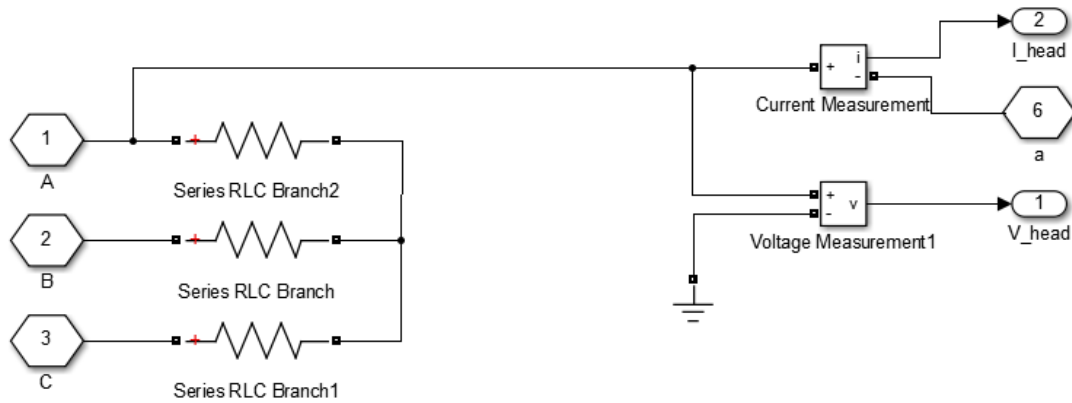


Figura 4-3. Nudo 2 de la red con CA en el caso monofásico

Como ya se ha mencionado anteriormente, en la red de CA con suministro en trifásica, hay tres fases más el neutro, yendo todas estas a todos los nudos de la red de CA como se muestra en la Figura 4-4, que representa únicamente la red de CA del caso trifásico. En cambio, en la red de CA con suministro monofásico, hay una fase más el neutro que van a todos los nudos de la red, exceptuando el tramo que hay desde el transformador hasta el nudo de cabeza de la red de CA, como se puede apreciar en la Figura 4-5, que es el esquema de la red de CA del caso monofásico.

Figura 4-4. Red de CA del caso trifásico representada en Simulink

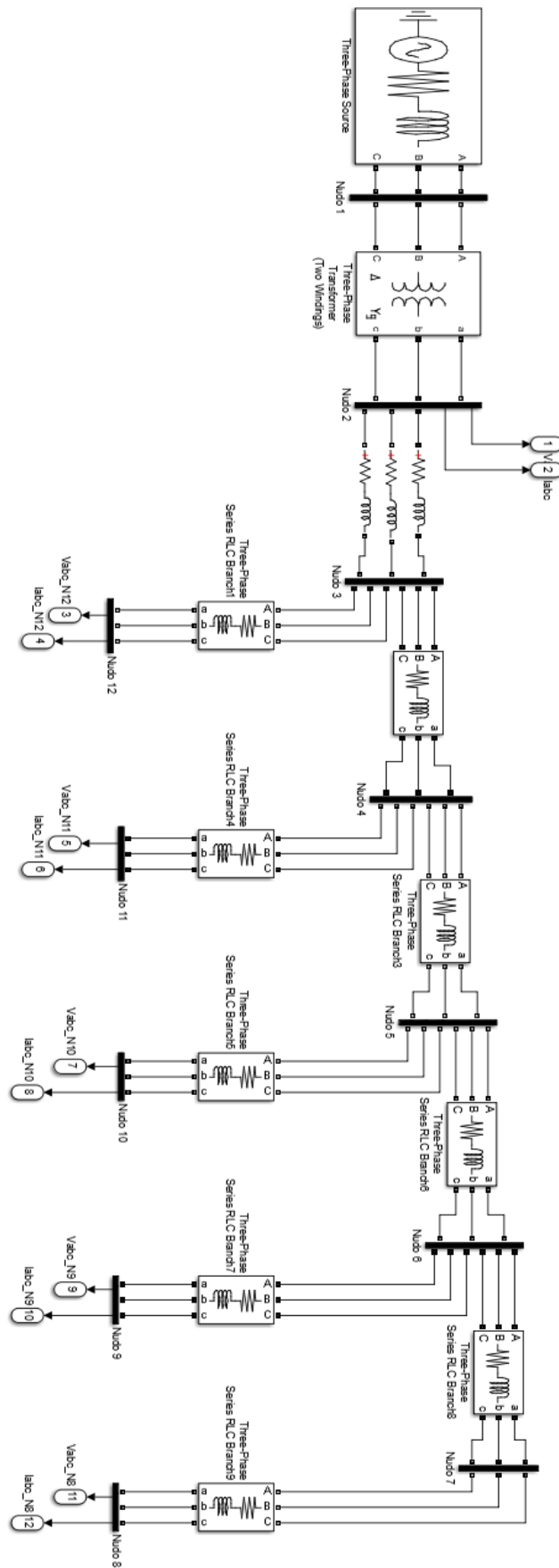
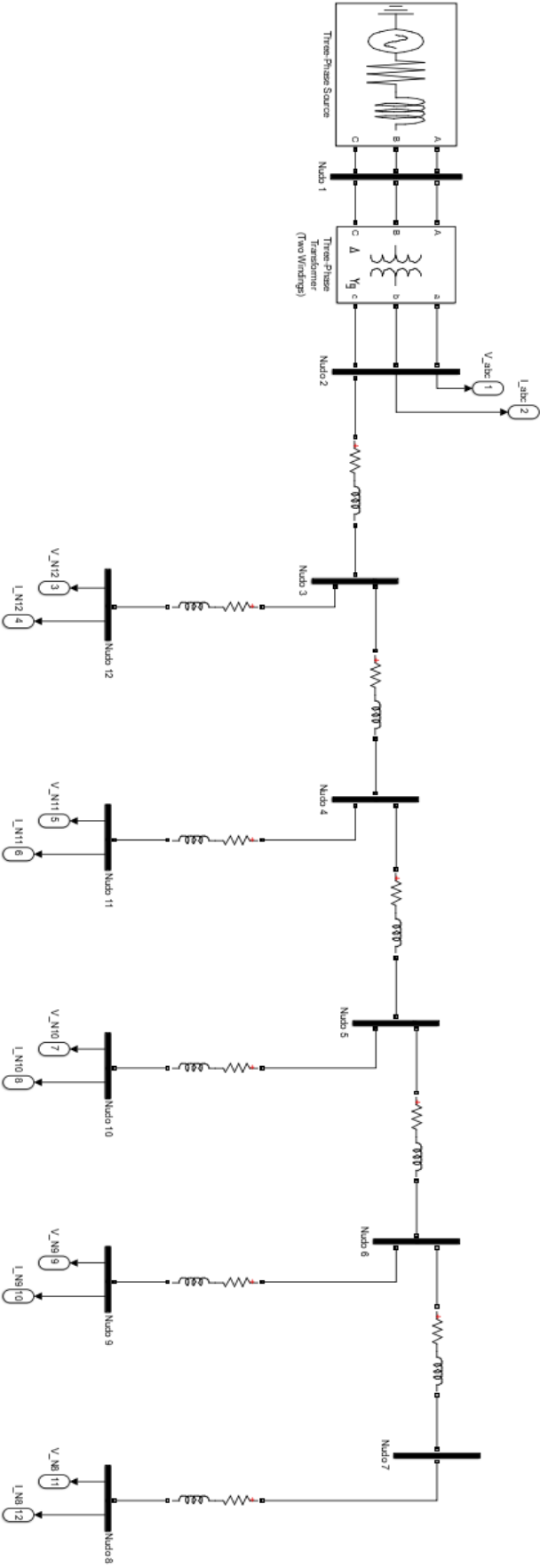


Figura 4-5. Red de CA del caso monofásico representada en Simulink



4.3 Red con CC

En la red con CC también hay dos posibles alternativas, al igual que en la red con CA, aunque la red de CC no se ve afectada por el tipo de suministro pues siempre es monofásico, puesto que es un circuito cerrado. Lo que modifica la red de CC son las dos alternativas que existen para la sección del cable de la red de CC, lo cual afecta en las pérdidas de potencia y caída de tensión ocasionada en la línea. También se ve alterada por el tipo de suministro que hay en la red de CA ya que esto afecta en el número de viviendas que se posiciona en cada nudo de esta, y por tanto, en el número de VEs que se coloca en cada toma de la red de CC, al haberse determinado que hay un VE por cada vivienda, como anteriormente se comentó en el capítulo de “Escenarios de estudio”.

Al igual que en la red con CA, primero se va a explicar las características que tienen en común las dos configuraciones que existen para la red de CC y a continuación las diferencias que hay entre ambas.

4.3.1 Similitudes entre las dos configuraciones de la red de CC

Comenzando por el transformador, como ya se ha comentado, hay dos caminos a la salida de este, yendo en este apartado por el lado donde se encuentra el convertidor, pues es el que se encarga de transformar la CA en CC, permitiendo así tener la red con CC que se desea.

Una vez se sale del convertidor comienza el circuito de CC, que es idéntico al esquema de la red de CA, como se observa en la Figura 4-7 para el caso monofásico y en la Figura 4-8 para el caso trifásico, mostradas más adelante, donde la línea azul representa la red de CC, siendo el mismo circuito en ambas figuras, y la línea negra la red de CA.

Los nudos que se encuentran en UG1 tienen dos caminos, uno que es seguir por UG1 hacia el siguiente nudo de esta y otro que sería ir al nudo que hay al final de UG3, en el cual se encuentra la carga equivalente a la de un VE, a excepción de que se esté en el escenario 5 de estudio puesto que hay GD y VEs en la red de CC. El único nudo que no está en paralelo es el nudo 7 que se encuentra en serie con el nudo 8 al ser el fin de la red de CC. A diferencia de la red con CA, las cargas que hay en la red de CC se introducen externamente, teniendo todos los nudos de UG3 el mismo diseño, mostrado en la Figura 4-6, donde se observa que hay medidores de tensión e intensidad, para así poder obtener los valores que se necesitan en los cálculos de la caída de tensión y de las pérdidas de potencia producida en la línea.

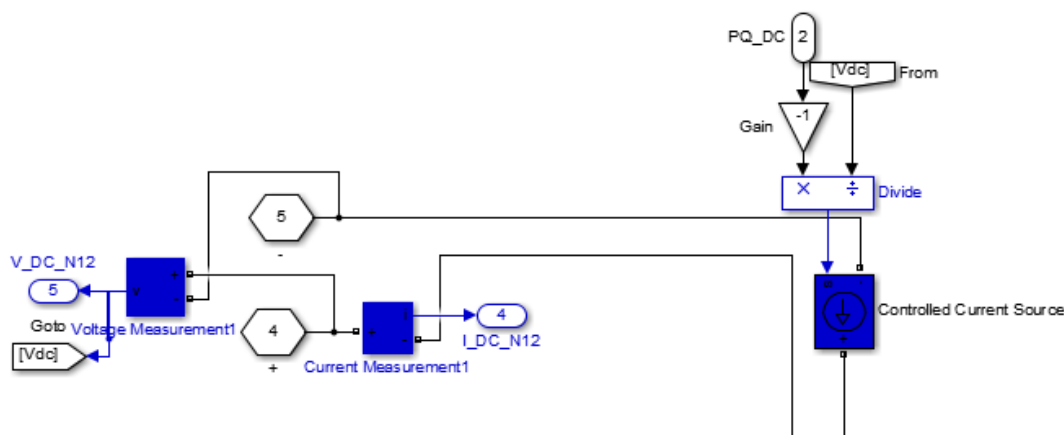


Figura 4-6. Nudo 12 de la red de CC

Hay una diferencia en función del tipo de suministro que hay en la red de CA, debido a que, se pone un VE en la red de CC por cada vivienda que hay en la red de CA. Esto significa que cuando se esté en el caso trifásico, en la red de CC habrá en cada nudo el triple de carga que en el caso monofásico, independientemente de la sección del cable de la red de CC que haya en ese momento.

Figura 4-7. Red híbrida CA/CC para el caso monofásico representada en Simulink

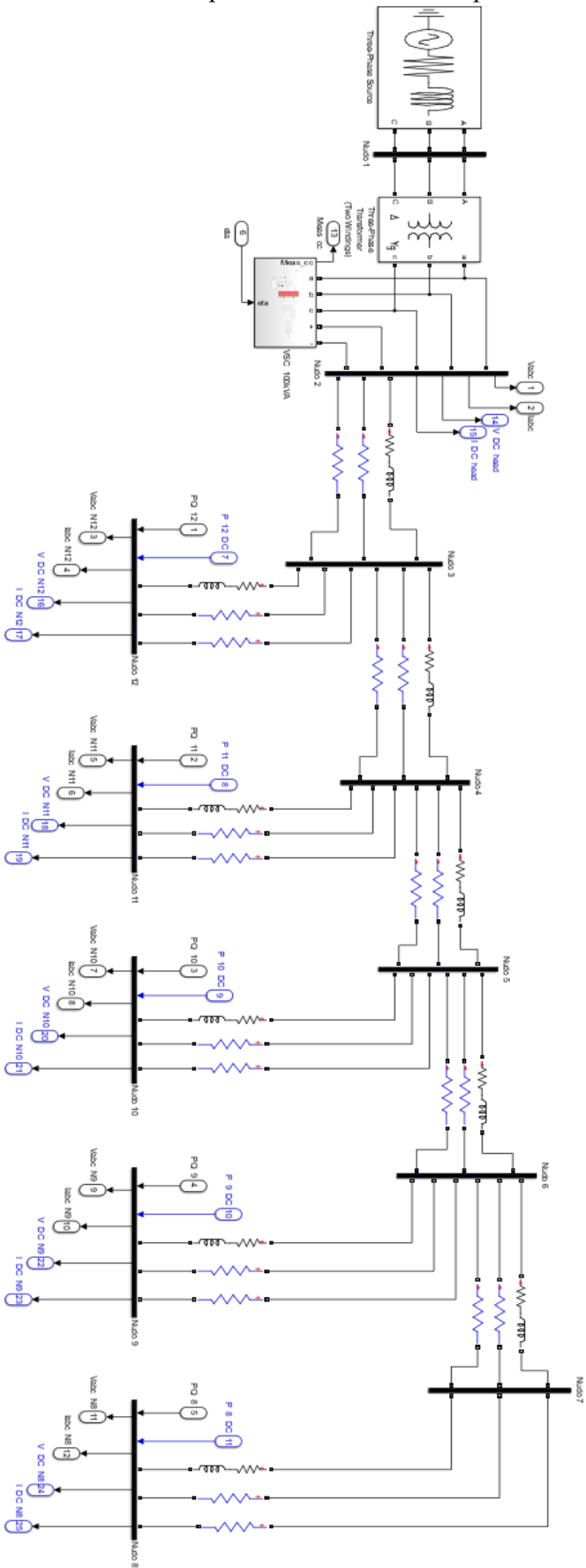
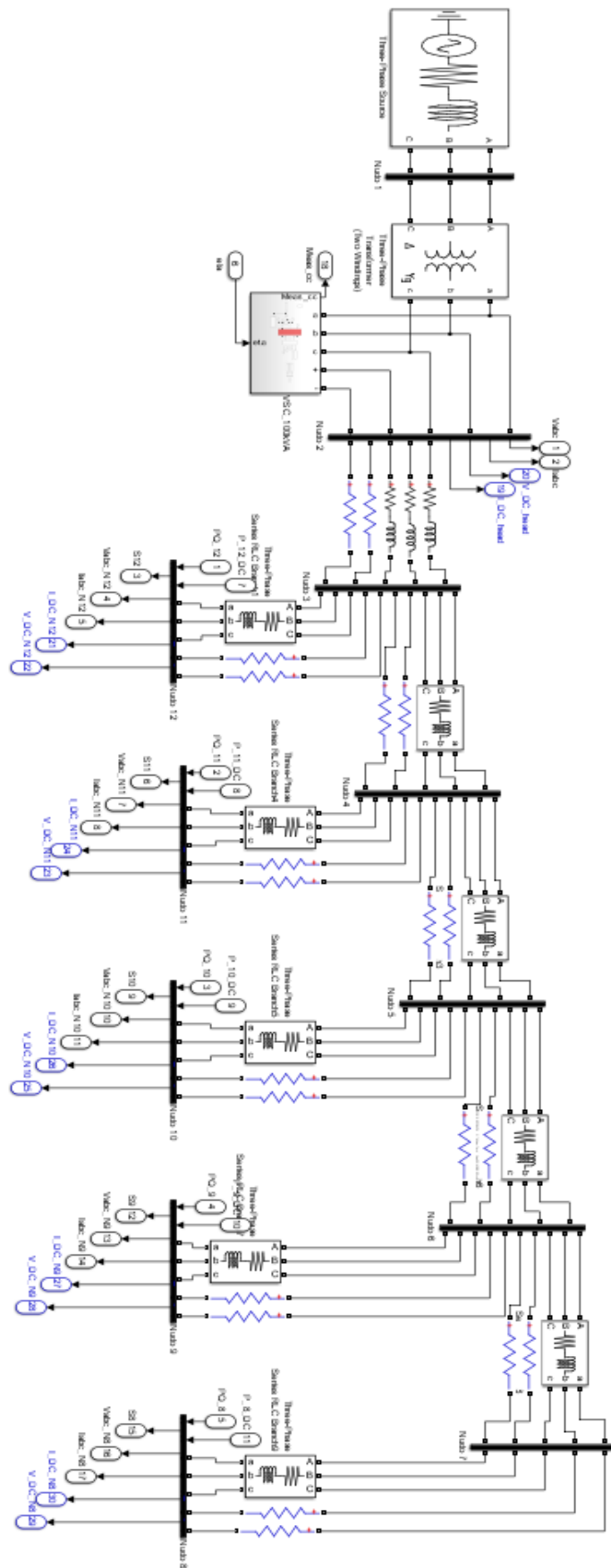


Figura 4-8. Red híbrida CA/CC para el caso trifásico representada en Simulink



4.3.2 Diferencias entre las dos configuraciones de la red de CC

Para la red de CC hay dos alternativas en función de la sección del cable que se considere, lo cual no modifica el diseño de la red de CC, pues la longitud del cable sigue siendo la misma entre los distintos tramos de cable que hay entre los nudos, pero sí afecta en los valores de caída de tensión y pérdida de potencia que se producen en la línea, ya que varía la resistencia del cable como se mostró en el capítulo de “Configuración de los casos de estudio”. Esto hace que se tenga que diferenciar en el Simulink ambas alternativas de la red de CC al tener que introducir en cada opción resistencias distintas para las líneas, obteniéndose distintos datos de potencia y tensión en cada alternativa. A su vez, esto hace que también se tenga que distinguir las dos configuraciones de la red de CC cuando se obtienen los resultados tras los cálculos realizados, como se demostrará en el siguiente capítulo “Resultados de los escenarios de estudio”.

5 RESULTADOS DE LOS ESCENARIOS DE ESTUDIO

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos mediante las simulaciones de todos los casos de estudio y escenarios diseñados para obtener una visión amplia de los diferentes hábitos y configuraciones posibles en las instalaciones domésticas futuras. Para realizar el análisis de estos resultados, este documento realiza un estudio de los valores de caída de tensión y pérdida de potencia en línea producidos en la red híbrida CA/CC, calculados con los valores de tensiones, intensidades y potencias obtenidos tras la simulación en Simulink para la red híbrida CA/CC, tanto para el caso trifásico como para el caso monofásico, como para las dos alternativas que hay de la red de CC. Con ello, se pretende ver las ventajas y desventajas que presenta cada escenario de estudio.

En primer lugar se va a analizar los escenarios en los que sólo hay red de CA, posteriormente se analizarán las dos configuraciones que existen para la red de CC que pertenecen a la red híbrida CA/CC, y por último, se compararán los diferentes escenarios y casos de estudio conjuntamente. Los valores con los que se realizan este estudio están recogidos en Anexo.

5.1 Red de CA

En primer lugar, sólo se van a considerar los escenarios que están formados únicamente por la red de CA, que son el escenario 0, el escenario 1 y el escenario 2. Donde, el escenario 0 únicamente utiliza la carga de las viviendas, el escenario 1 incluye la carga de las viviendas y la de los VEs, y el escenario 2 la carga de las viviendas y los VEs pero se le incorpora la GD. Con ello, se quiere sectorizar los resultados obtenidos evaluando las mejores alternativas en cada caso para realizar un estudio comparativo más adecuado, evitando así, la superposición de casos de estudio y escenarios posibles que dificulten el análisis.

En las gráficas mostradas a continuación se representan los tres escenarios en función de la caída de tensión, tanto para el caso monofásico en la Figura 5-1 como para el caso trifásico en la Figura 5-3, ya que el caso trifásico representa el triple de cargas que el caso monofásico en un mismo nudo, debiéndose cumplir para cada escenario el criterio de máxima caída de tensión admisible que es entorno a un 5% según grandes empresas como IBERDROLA [10], puesto que, como queda recogido en la ITC-BT-11 [11], la máxima caída de tensión admisible en la red de distribución en BT la fijan las empresas distribuidoras de la zona donde se encuentre la red. De igual modo, también se representan las pérdidas de potencia activa producidas a lo largo de la línea, siendo la Figura 5-2 la del caso monofásico y la Figura 5-4 la del caso trifásico.

En los dos tipos de gráficas representadas, se utilizan como referencia del comportamiento de la red de CA los valores de los nudos 8 y 12 de la red de distribución en BT, puesto que, el nudo 12 es el nudo de suministro más cercano a la cabecera y el nudo 8 es el nudo eléctricamente más alejado. Con estos parámetros, se evalúa el comportamiento de la red de CA en función de la carga que debe aportar en cada escenario y del tipo de suministro que se tiene en ese escenario.

Una vez realizadas estas aclaraciones, se va a comenzar a analizar el caso monofásico, empezando por la Figura 5-1 que representa la caída de tensión, siendo de color naranja los valores del nudo 12 de cada escenario y de color azul los valores del nudo 8. Se puede apreciar que en el nudo 8 siempre hay una caída de tensión mayor que en el nudo 12, independientemente del escenario, debido a que es el último nudo de la red de CA. Por otra parte, al comparar los escenarios entre ellos, se observa que el escenario donde hay menos caída de tensión es el 0 que es, por lo general, como actualmente se encuentra la red de distribución en BT. El escenario 1 es el que presenta mayores caídas de tensión, debido al incremento de carga por el consumo del VE, viéndose estas reducidas al incorporar GD a la

Resultados de los escenarios de estudio

red de CA cuando hay VEs y viviendas conjuntamente en una misma toma, representado esto último en el escenario 2. Por último, es interesante destacar que en el escenario 1 y 2 se tiene una caída de tensión mayor del 5% en el nudo 8, resultado inapropiado para una calidad de suministro adecuada, siendo en el caso del escenario 1 más acusada dado que incluso el nudo 12 supera dicho valor. Por lo tanto, viendo los resultados obtenidos en esta figura, se puede comprobar que los hábitos futuros de consumo pueden ocasionar problemas en la calidad de suministro de la red, llegando a provocar niveles de tensión inadmisibles, no siendo posible suplirlos con la GD promedio.

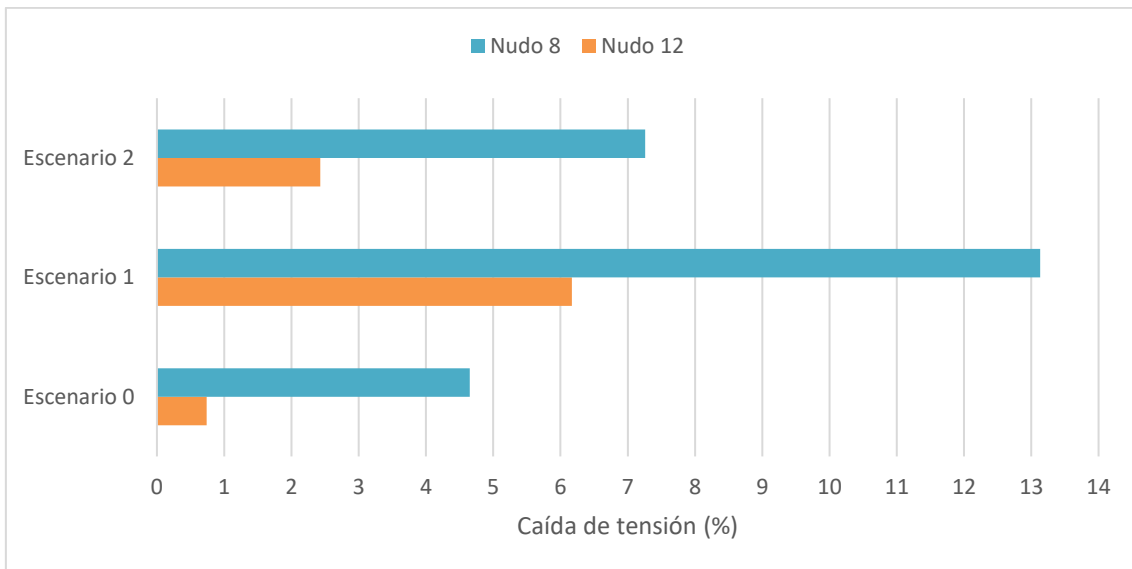


Figura 5-1. Caída de tensión de los escenarios 0, 1 y 2 del caso monofásico

Continuando con el caso monofásico pero teniendo ahora en cuenta las pérdidas de potencia activa que se producen por la línea, reflejado en la Figura 5-2, siendo el rojo las pérdidas que presenta el nudo 12 y el morado las pérdidas que hay al final de la red, nudo 8. Se puede observar que el escenario 0 es el que presenta menores pérdidas seguido por el escenario 2, hecho que corrobora las caídas de tensión obtenidas para estos escenarios en la Figura 5-1.

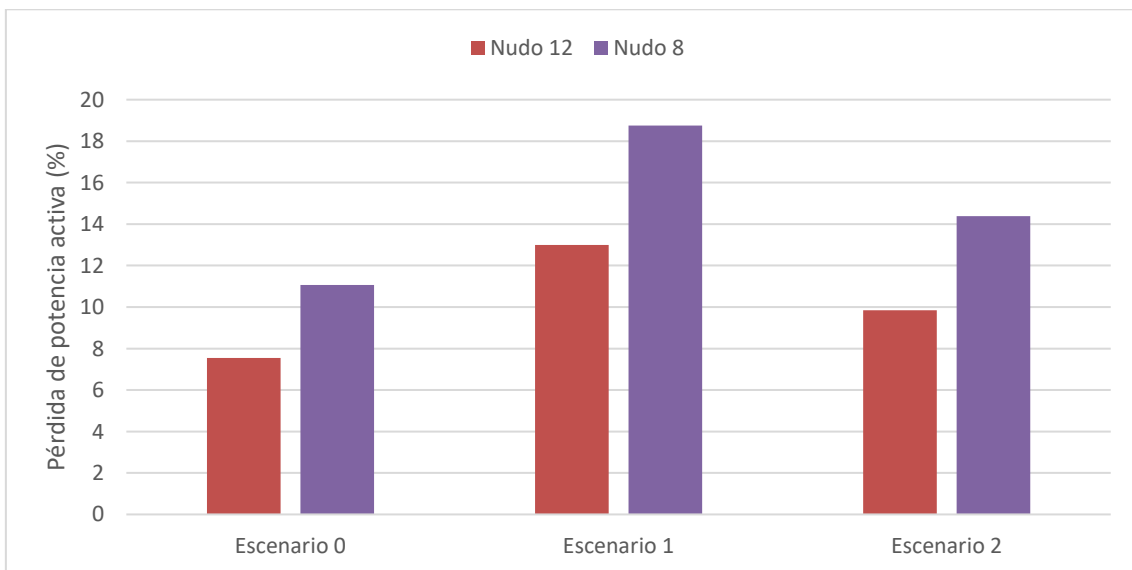


Figura 5-2. Pérdida de potencia activa de los escenarios 0, 1 y 2 del caso monofásico

Por otra parte, para el caso trifásico, se representan las caídas de tensión en la Figura 5-3, siendo el nudo 8 el de color azul y el nudo 12 el de color naranja. Se puede observar que en el escenario 0 es donde menos caída de tensión hay, habiendo una gran diferencia de tensión entre el primer y último nudo de la red, aún así, esta dentro del criterio de máxima caída de tensión admisible. En los otros dos escenarios se ve que no cumplen dicho criterio de máxima caída de tensión, 5%, a pesar de contar el escenario 2 con GD.

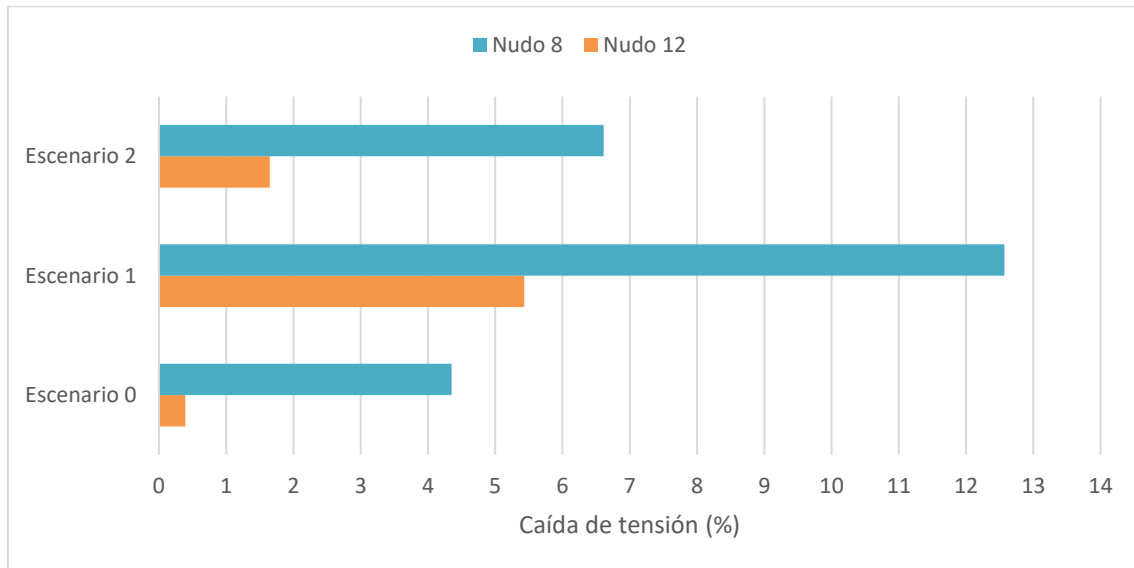


Figura 5-3. Caída de tensión de los escenarios 0, 1 y 2 del caso trifásico

Por otro lado, en la Figura 5-4, se ven las pérdidas de potencia activa producidas en el caso trifásico en los escenarios 0, 1 y 2, se observa que el escenario 1 es el que mayores pérdidas presenta ya que en cada nudo tiene el doble de carga que en el escenario 0. Al incorporar GD a la red de CA cuando esta contiene la carga de las viviendas junto con la de los VEs, se reduce considerablemente las pérdidas, siendo este el escenario 2. A pesar de ello, el escenario que tiene menos pérdidas de potencia es el escenario 0 que sólo tiene en cuenta las cargas de las viviendas, que es como actualmente se encuentra la red de distribución en BT.

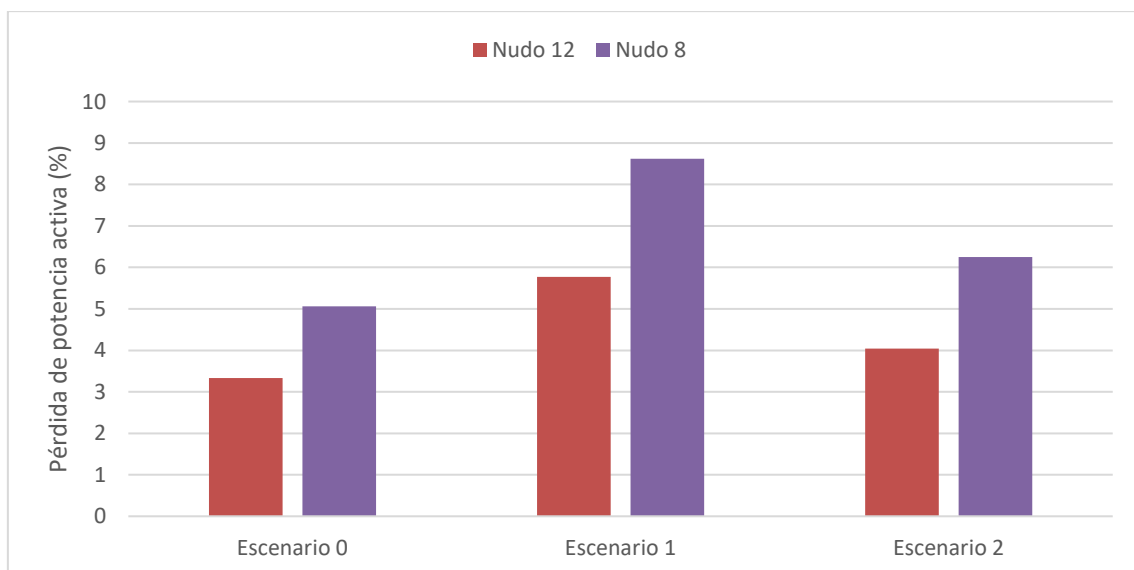


Figura 5-4. Pérdida de potencia activa de los escenarios 0, 1 y 2 del caso trifásico

En definitiva, de estos tres escenarios expuestos, tanto cuando el suministro es trifásico como cuando es monofásico, la única situación que cumple con el criterio de máxima caída de tensión es el del escenario 0. Por tanto, se demuestra que la red de distribución en BT actual no es capaz de aportar el suministro de energía eléctrica de forma segura y con calidad, por lo que sería aconsejable introducir a la red de CA ya existente una red con CC para la carga de los VEs, evitando así que se pueda llegar a saturar la red de CA existente puesto que no fue diseñada para aportar tanta energía eléctrica a la vez.

5.2 Red híbrida CA/CC

Tras comprobar la necesidad de readaptar la red de CA actual para poder abordar los hábitos futuros de consumo, se va a analizar a continuación la propuesta de red híbrida CA/CC, con la que se pretende dar solución al problema que se presenta ante el nuevo marco energético que se está produciendo con los VEs y la GD.

En la red híbrida CA/CC se van a analizar tres escenarios descritos anteriormente en el capítulo 3, siendo los escenarios 3, 4 y 5. Si se desglosa en función de la carga de la red, la red de CA contiene la carga equivalente a las viviendas y la red de CC la carga de los VEs, siendo esta configuración de las redes la que define al escenario 3. En el escenario 4 se sigue la misma configuración de la red híbrida que en el escenario 3 pero se le incorpora GD a cada vivienda de la red de CA. En el escenario 5 también se introduce GD aunque esta vez en la red de CC, a diferencia del escenario 4.

Por otra parte, dentro de cada caso de estudio, para la red de CC hay que hacer distinción entre dos alternativas de esta en función de la sección del cable, siendo la configuración 1 de la red de CC la que tiene una sección de cable menor, mientras que la configuración 2 de la red de CC tiene una sección de cable mayor, teniendo esta última configuración una sección más similar a la que tiene la red de CA. Tanto para el caso trifásico como para el caso monofásico se tienen impuestas las mismas características de la red de CC, variando únicamente la carga que se ha colocado en cada toma de la red de CC, habiendo para el caso trifásico el triple de potencia a suministrar en cada nudo con respecto al caso monofásico.

A continuación se va a analizar la red de CC con sus dos configuraciones para ambas opciones de suministro de la red de CA. Sólo se va a representar los valores de caída de tensión y pérdida de potencia de los nudos 8 y 12 de la red de CC porque son el principio y fin de la red de distribución en este estudio.

Primero se va a analizar las caídas de tensión obtenidas en la Figura 5-5 para el caso monofásico y las pérdidas de potencia que se han producido, Figura 5-6, después se analizará para el caso trifásico las caídas de tensión generadas, Figura 5-7, y las pérdidas de potencia activa producidas en la línea, Figura 5-8. Para todas estas gráficas, se representan el nudo 8 y el nudo 12 para cada escenario, estando representado el escenario 3 y 4 en color naranja y el escenario 5 en color azul cuando la sección del cable de la red de CC es pequeña, opción 1 de la red de CC. Cuando la sección del cable de CC es similar a la de la red de CA, el escenario 3 y 4 se representa en morado y el escenario 5 en rojo, opción 2 de la red de CC.

Para el caso monofásico, se observa en la Figura 5-5 que en todos los escenarios la caída de tensión es pequeña. A pesar de ello, el escenario que presenta una caída de tensión mayor son los escenarios 3 y 4 cuando la red de CC tiene poca sección, opción 1. A estos escenarios le siguen los mismos escenarios pero para la otra opción de la red de CC que existe, ya que en ambas situaciones, los escenarios 3 y 4 no tienen GD en la red de CC, únicamente contienen la carga de los VEs. Esto hace que las menores caídas de tensión se obtengan para el escenario 5 pues si contiene GD en la red de CC. Aún así, dentro de las dos posibilidades que hay para el escenario 5, el que consigue unos valores más bajos de caída de tensión es la segunda alternativa de la red de CC, cuando la sección del cable es similar a la de la red de CA.

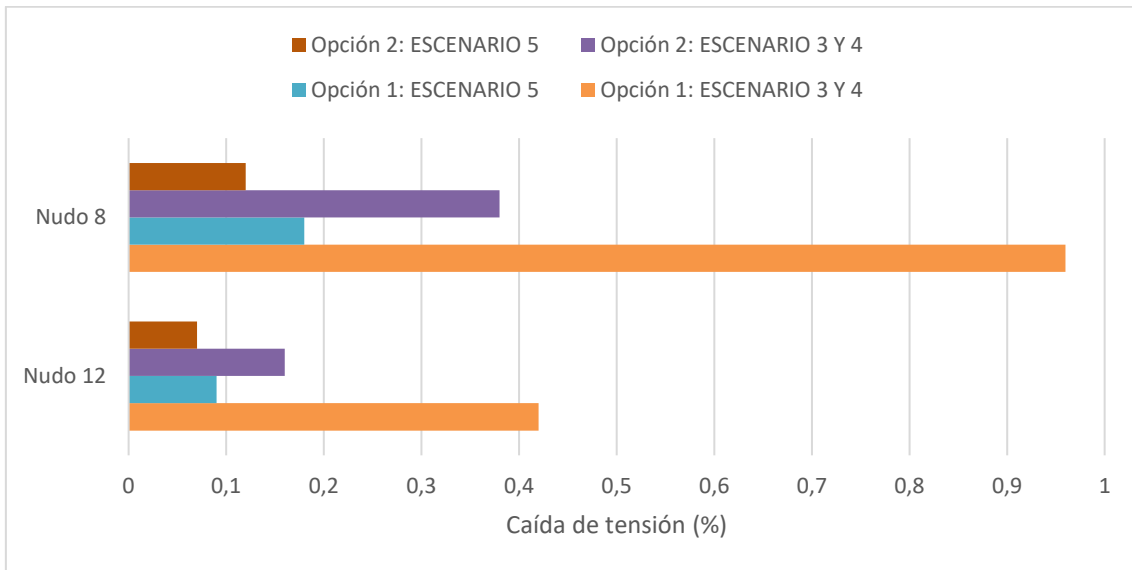


Figura 5-5. Caída de tensión en la red de CC en los escenarios 3, 4 y 5 del caso monofásico

Por otro lado, si se observan las pérdidas de potencia activa ocasionadas en el caso monofásico, Figura 5-6, se ve que donde más pérdidas hay son en los escenarios 3 y 4 de las dos posibilidades de la red de CC, al igual que con la caída de tensión. En cambio, quien menos pérdida de potencia en la línea presenta es el escenario 5 de la opción 1 de la red de CC, a pesar de que tiene una caída de tensión mayor que la opción 2 de este mismo escenario.

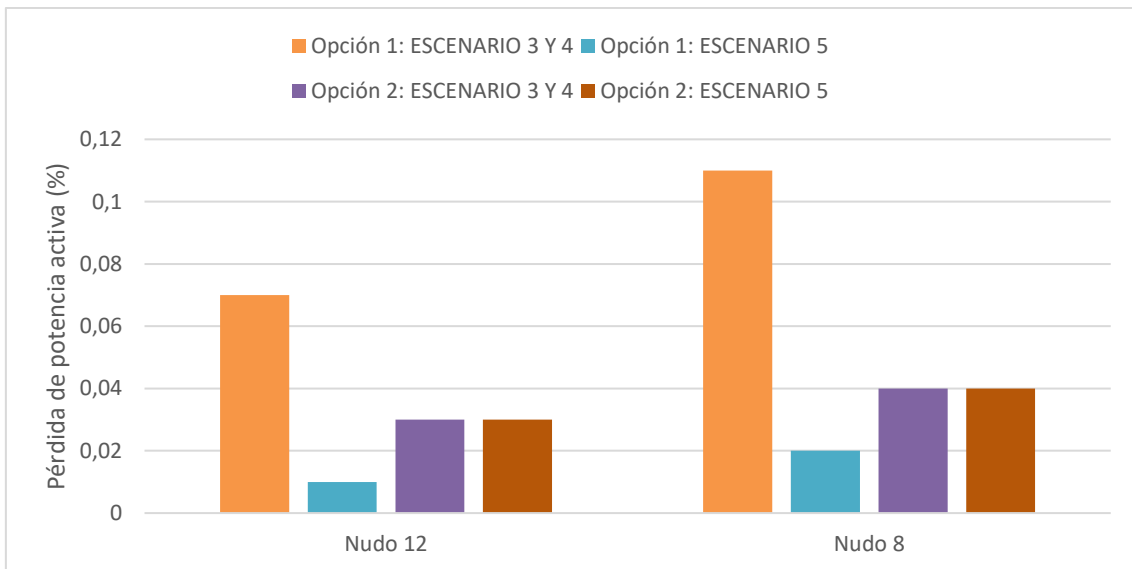


Figura 5-6. Pérdida de potencia activa en la red de CC en los escenarios 3, 4 y 5 del caso monofásico

Por otra parte, para el caso de trifásico, la tendencia que hay en los distintos escenarios con la caída de tensión es idéntica que el caso monofásico como se puede ver en la Figura 5-7, siendo los escenarios 3 y 4 de la opción 1 de la red de CC el que presenta una mayor caída de tensión y el escenario 5 de la opción 2 de la red de CC el que tiene una menor caída de tensión.

Resultados de los escenarios de estudio

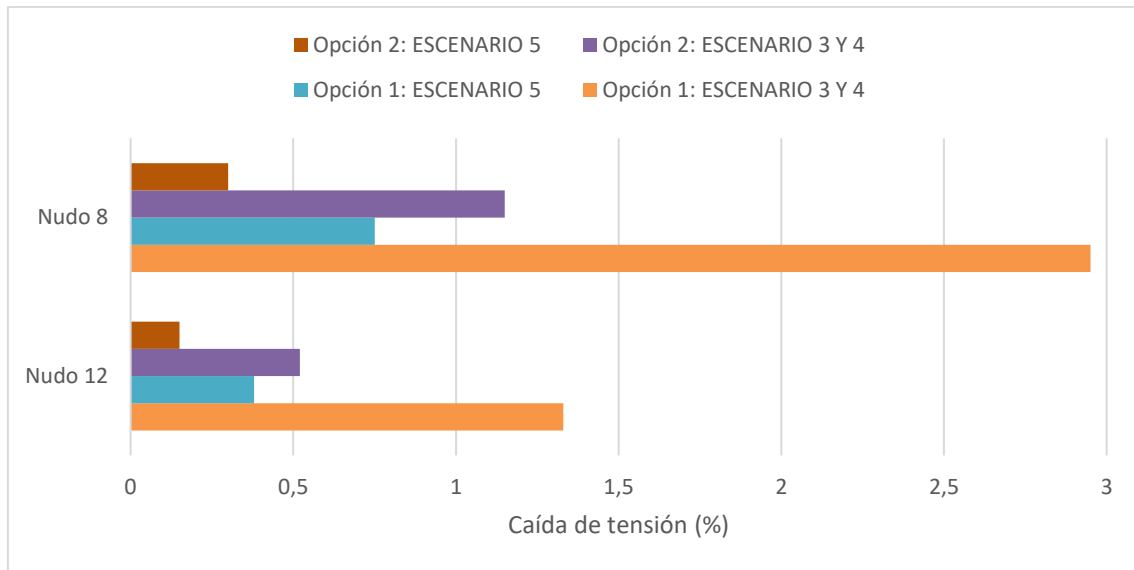


Figura 5-7. Caída de tensión en la red de CC en los escenarios 3, 4 y 5 del caso trifásico

En cuanto a las pérdidas de potencia activa ocasionadas en la línea para el caso trifásico, donde mayores pérdidas hay son en los escenarios 3 y 4 de la red de CC, seguido por el escenario 5 de la opción 1 de la red de CC. Es decir, el que menos pérdidas presenta es el escenario 5 de la segunda alternativa de la red de CC, a diferencia del caso monofásico.

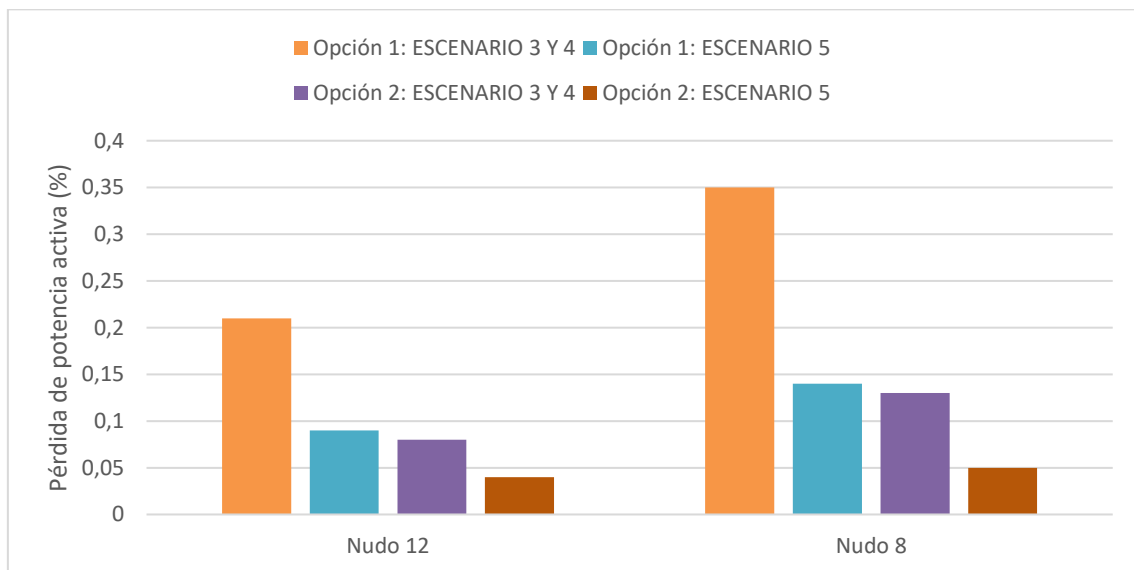


Figura 5-8. Pérdida de potencia activa en la red de CC en los escenarios 3, 4 y 5 del caso trifásico

En definitiva, si no se tiene GD en la red de CC, interesa tanto para el caso trifásico como para el monofásico que la red de CC tenga una sección similar a la red de CA, manteniéndose esta elección de la red de CC también para el escenario 5 de los dos casos de estudio pues es donde hay menores caídas de tensión.

5.3 Comparación de los escenarios de estudio entre el caso monofásico y el caso trifásico

En este apartado se va a proceder a comparar el caso monofásico con el caso trifásico pero partiendo de las conclusiones obtenidas para cada caso en los apartados anteriores de este capítulo, de este modo, no se van a exponer todos los escenarios estudiados.

En primer lugar, tanto para el caso trifásico como para el caso monofásico, se ha descartado la posibilidad de que en la red de distribución en BT que actualmente existe, la cual contiene CA, sea viable para disponer de un suministro seguro y de calidad si se le incorpora la carga de los VEs junto con la de las viviendas que ya hay, sin poderse mejorar esta situación con la incorporación de GD. Por tanto, solo se van a comparar los tres escenarios de estudio de la red híbrida CA/CC.

En segundo lugar, dentro de la red híbrida, tras los análisis realizados para las dos posibilidades que existen de la red de CC en función de la sección del cable, sólo se van a plantear para cada caso de estudio los escenarios que presentan unos resultados más ventajosos. Por tanto, para el caso monofásico y el caso trifásico, para los tres escenarios a comparar, se va a considerar para la red de CC la segunda alternativa, es decir, cuando la sección del cable con CC es similar a la de la red de CA.

Con estas aclaraciones, se procede a comparar los dos casos de estudio de la red híbrida CA/CC para ver las ventajas y desventajas que presenta cada posibilidad, representándose únicamente los valores de los nudos 8 y 12 de la red híbrida CA/CC por separado porque son representativos del resto de nudos de la red, al ser el último y primer nudo con carga. Los escenarios a comparar son el escenario 3, que tiene la carga de las viviendas en la red de CA y la de los VEs en la red de CC, el escenario 4 que es idéntico al escenario 3 pero con GD en la red de CA, y el escenario 5 que también es parecido al escenario 3 pero con GD en la red de CC.

Empezando por la caída de tensión que se produce en cada escenario para cada red, en la Figura 5-9 se representa la caída de tensión que se produce en el nudo 12 de los diferentes escenarios, pudiéndose observar que en la red de CA el escenario 4 para ambos casos de estudio es el que tiene una caída de tensión mayor a pesar de tener GD en dicha red. Además, dentro de los dos casos de estudio, cuando el suministro de la red con CA es monofásico, se obtienen al comienzo de la red de CA peores valores de caída de tensión que para el caso trifásico. En cambio, en la red de CC ocurre lo contrario, al inicio de la red de CC, para el caso monofásico de la red de CA, se tiene menores caídas de tensión que cuando hay suministro trifásico en la red de CA.

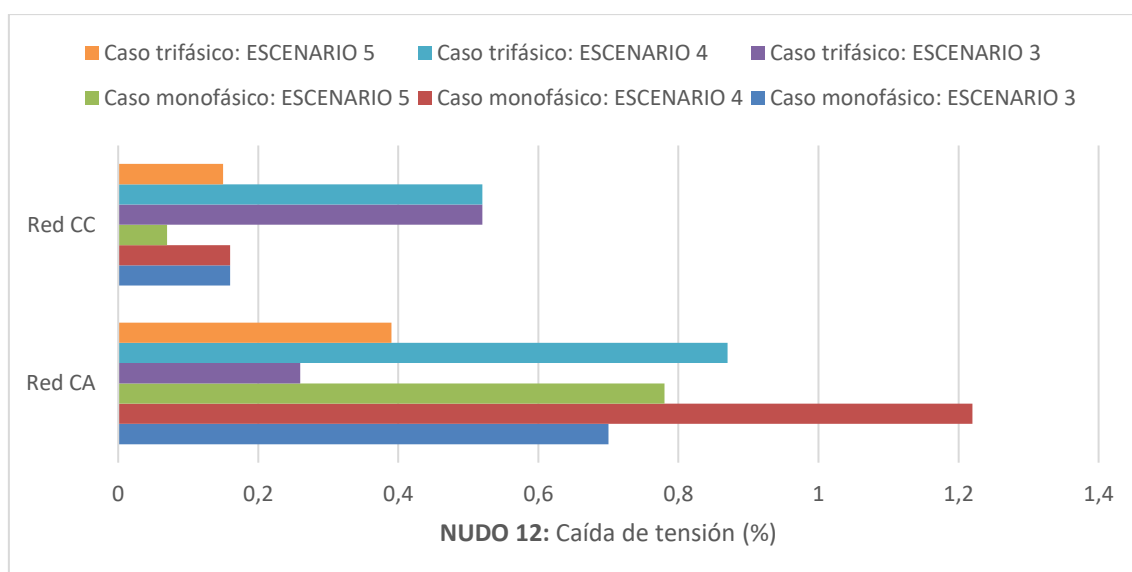


Figura 5-9. Caída de tensión del nudo 12 en los escenarios 3, 4 y 5 de los diferentes casos de estudio

Continuando con la caída de tensión para el nudo 8, que es el final de la red de distribución híbrida, Figura 5-10, se observa que en la red de CA es menor la caída de tensión cuando hay GD en ella (escenario 4), a diferencia del nudo 12, encontrándose ahora las mayores caídas de tensión en los escenarios 3 y 5 del caso monofásico. En cambio, en la red de CC se mantiene el mismo comportamiento en la caída de tensión que en el nudo 12. Esto es debido a que en todo momento se tiene la misma red de CC, variando únicamente la carga en función del tipo de suministro que tiene la red de CA, esto hace que para el caso trifásico la carga de la red de CC sea tres veces mayor que para el caso monofásico, presentando por tanto unas caídas de tensión mayores en el caso trifásico aunque proporcionales a las del caso monofásico.

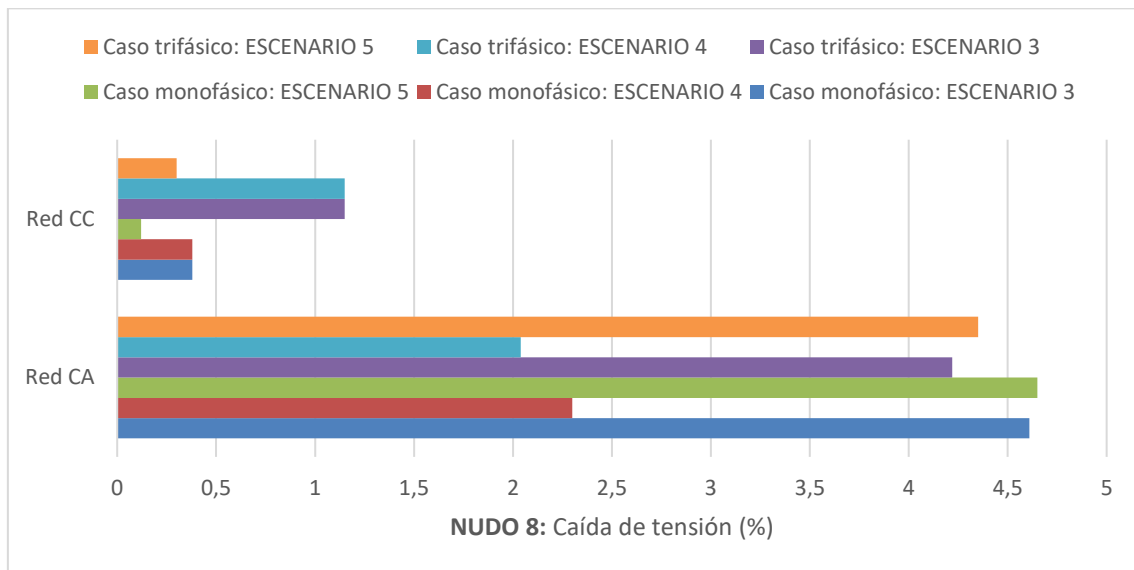


Figura 5-10. Caída de tensión del nudo 8 en los escenarios 3, 4 y 5 de los diferentes casos de estudio

Por otra parte, si se observa las pérdidas de potencia activa que se producen por la línea en cada caso, se ve que tanto en el nudo 12, Figura 5-11, como en el nudo 8, Figura 5-12, las pérdidas en la red de CC en comparación con la red de CA son muy pequeñas, siendo estas un poquito mayores cuando se está en el caso de estudio trifásico. A pesar de esto, tanto la red de CC como la red de CA presentan unos comportamientos en pérdidas de potencia activa a lo largo de la red muy parecidos como se observa en los nudos 8 y 12, siendo mayor las pérdidas cuando no hay GD en la red correspondiente.

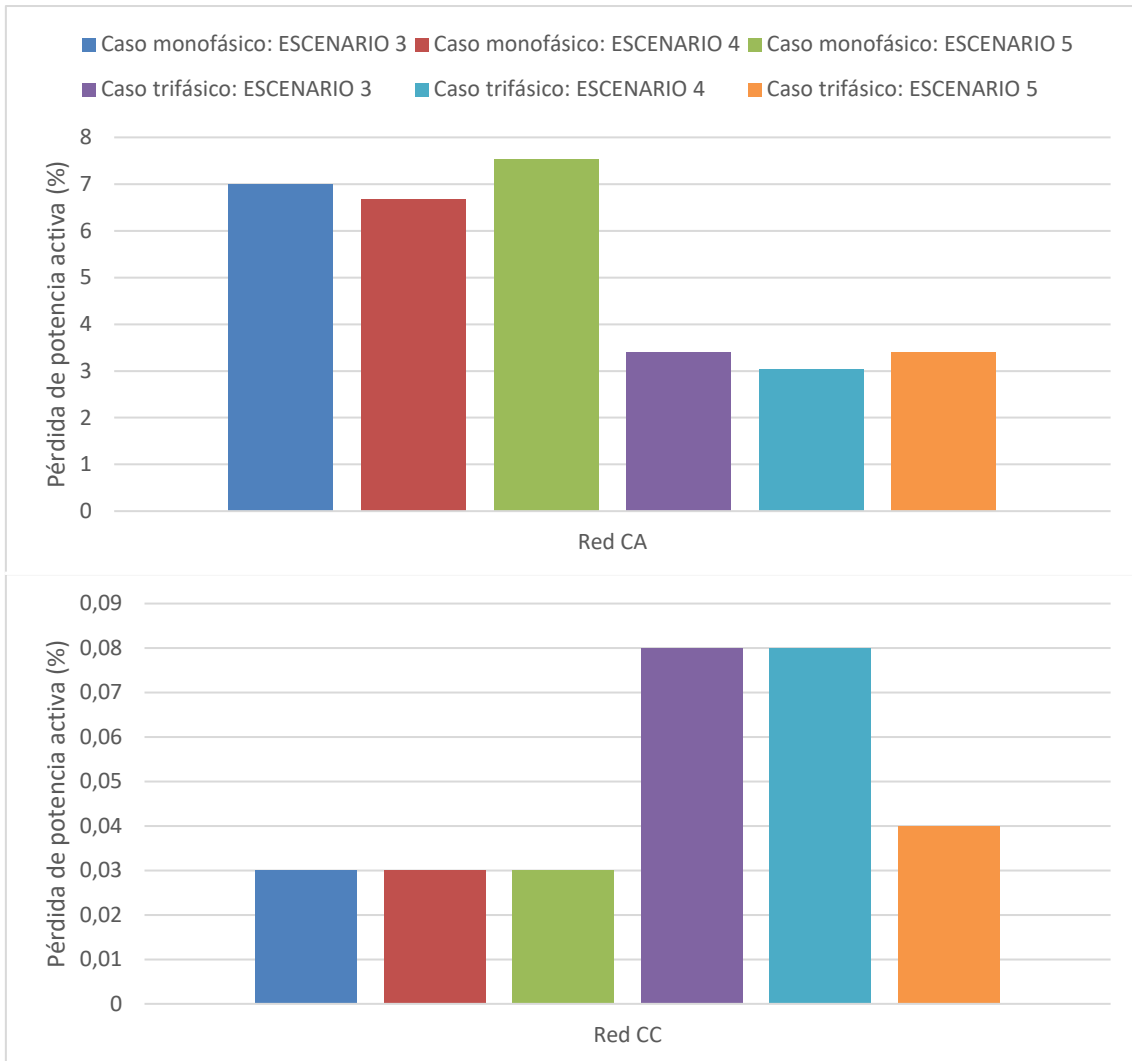


Figura 5-11. Pérdida de potencia activa del nudo 12 en los escenarios 3, 4 y 5 de los diferentes casos de estudio

Aunque las pérdidas de potencia parecen similares entre el nudo 12 y el nudo 8, se puede ver que en al comienzo de la red híbrida estas pérdidas son algo mayores que al final de la red de distribución en BT, siendo aún mayores si se está en el caso monofásico.

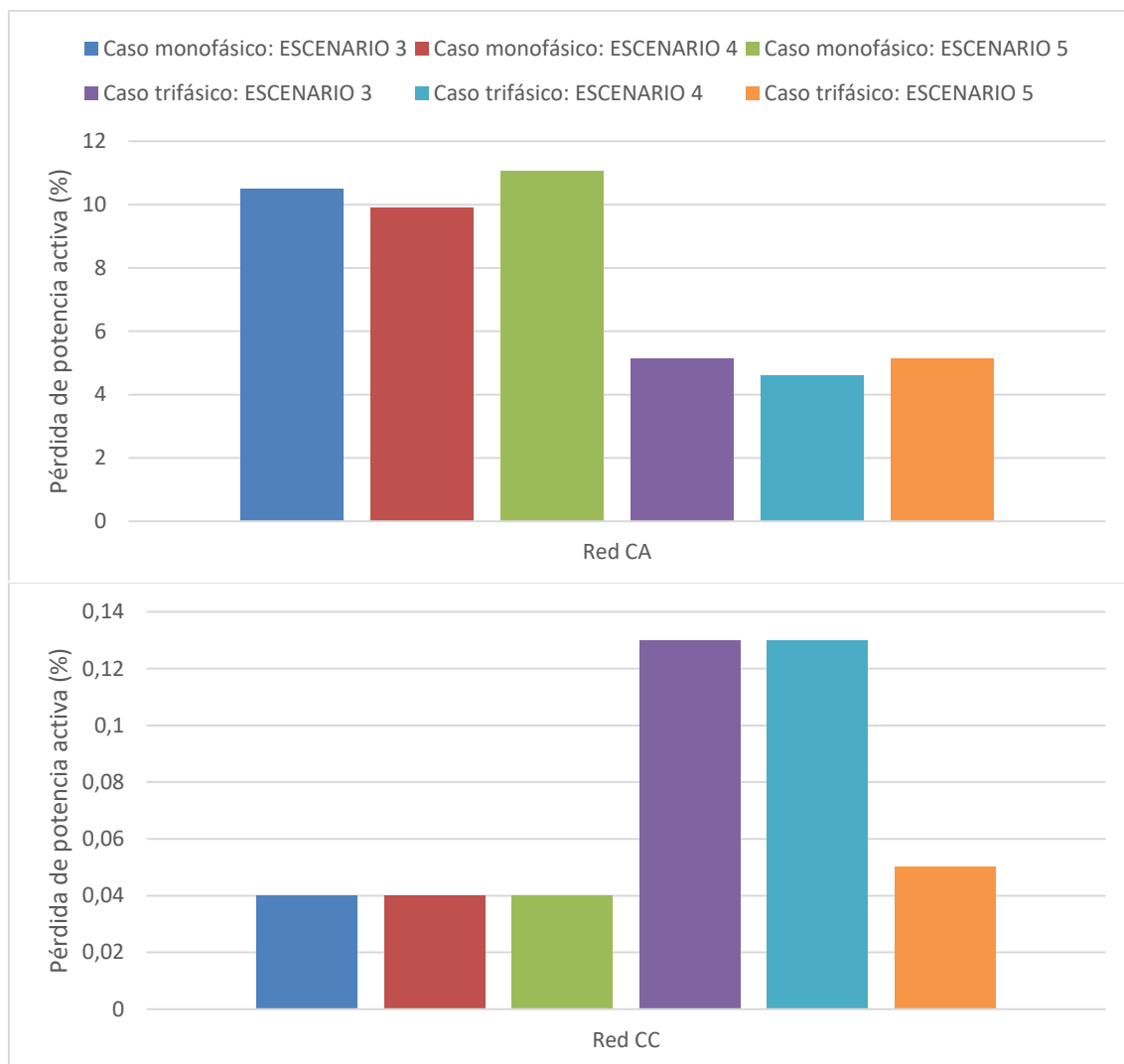


Figura 5-12. Pérdida de potencia activa del nudo 8 en los escenarios 3, 4 y 5 de los diferentes casos de estudio

Finalmente, tras estas observaciones, se puede concluir que el caso trifásico es más beneficioso que el monofásico porque además de poder tener más cargas monofásicas conectadas a la red al haber más fases, las caídas de tensión y pérdidas de potencia activa producidas a lo largo de la red son, por lo general, más pequeñas que cuando la red de CA tiene suministro monofásico. Además si se llegase a incorporar GD en la red de CA, estos valores de caída de tensión y pérdida de potencia serían aún menores.

Por otra parte, en la red de CC cuando se tiene suministro trifásico en la red de CA, se consiguen mayores caídas de tensión y pérdidas de potencia por la línea, pero también se tiene la posibilidad de tener más potencia en cada nudo, por lo que es beneficioso. Además, si se comparan las caídas de tensión obtenidas en la red de CC con las de la red de CA, estas caídas de tensión son casi cuatro veces más pequeñas, por lo que la red de CC tiene muy buen comportamiento, no habiendo mucha diferencia cuando se le incorpora GD. Hay que tener también en cuenta que no se ha hecho distinción horaria en este trabajo, por lo que, si se incorporase GD a la red de CC se podrían producir inconvenientes, ya que por lo general se cargaría el VE por la noche, necesitándose baterías para almacenar la energía obtenida mediante GD, siendo esto hoy por hoy una desventaja pues no está suficientemente

desarrollado para que sea rentable.

En definitiva, los escenarios más ventajosos son el 3 y el 4, descartando el escenario 5 pues tiene GD en la red de CC, lo cual hoy en día no es muy viable por el coste de los equipos de almacenamiento, entre otros motivos. Dentro de los escenarios 3 y 4 depende de si la vivienda cuenta con GD en la red de CA, siendo esto lo más beneficioso siempre que sea posible pues no toda la energía demandada la tendría que suministrar la compañía distribuidora.

6 CONCLUSIONES

La red de distribución en BT que hoy en día existe en las viviendas es de CA, la cual está diseñada para soportar de modo seguro la potencia que puede demandar una vivienda, además de dar calidad en el suministro. Esto se verá modificado cuando aumente la flota de VEs, ya que, actualmente hay un porcentaje muy pequeño de VEs circulando por las calles, en comparación con el número de vehículos que hay matriculados, pero en el momento que esto cambie, la red de CA no será capaz de soportarlo, como se ha visto en este trabajo, porque tendría que soportar puntualmente el doble de carga que la que soporta ahora y para la cual no está diseñada. Esto hace que actualmente la red de distribución en BT no pueda asegurar un suministro de calidad al consumidor si tiene que aportar la carga demandada por los VEs y las viviendas conjuntamente, pues puede saturarse, dando menos potencia de la requerida, puesto que aumentan las pérdidas de potencia ocasionadas por la línea y aumenta la caída de tensión. Además, aunque se le añada GD, la red mejora su comportamiento pero no lo suficiente pues hay partes en las que la caída de tensión sigue siendo muy elevada. Por tanto, se demuestra que la red de distribución en BT actual no será capaz de funcionar correctamente cuando en todas las viviendas haya un VE.

Una vez se ha concluido que la red de CA hay que readaptarla, en este trabajo se ha optado por la inserción de una segunda red con CC a la red de CA ya existente, de esta forma, no toda la carga demandada recaería sobre una única red, pudiendo compensarse entre ellas. Además, cada vez hay más equipos que requieren CC, de este modo, no habría que colocar un convertidor cada vez que se necesite CC puesto que se dispondría de una toma directa, teniendo por tanto una red de distribución híbrida CA/CC. Para ello, se han considerado dos secciones de cable diferentes en la red de CC, comprobando que mientras mayor es la sección del cable, menores son las pérdidas de potencia activa y la caída de tensión teniendo, por tanto, un comportamiento más óptimo la red de CC.

Las modificaciones que se realizan en la red de CA se hacen para mejorarla o mantenerla como se encuentra actualmente. Tras los estudios realizados, tanto para suministro monofásico como para suministro trifásico en la red de CA, se puede concluir que si la red contiene GD va a funcionar mejor, dando un suministro más flexible pues no toda la potencia demandada la tiene que dar la red de distribución en BT, recayendo una parte en la GD. Además, la introducción de GD en la red híbrida aumenta la tensión de salida de la red en la que se posiciona, por lo que, disminuye la caída de tensión. Esto es beneficioso puesto que permitiría poder insertar más equipos a la red de CA o aumentar la carga demandada por los consumidores ya existentes, en caso de que sea necesario, sin verse perjudicado negativamente la calidad de suministro que da la red de CA, ya que este exceso de potencia demandada sería equivalente a la que necesita la red de CA cuando no tiene GD. Por tanto, sería aconsejable que la red de CA contenga GD pues le aportaría más flexibilidad.

Por otra parte, la red de CC, al igual que la de CA, mejora cuando tiene GD. A pesar de ello, no sería rentable incorporarle GD a la red de CC puesto que los VEs generalmente se cargarían de noche, cuando la mayoría de las personas están en sus casas, lo que haría necesario almacenar la energía generada ya que sólo se obtiene energía mediante GD con paneles fotovoltaicos de día, cuando hay radiación solar. Hoy por hoy, el almacenamiento de energía no está suficientemente desarrollado como para disponer de una gran cantidad de energía, además de que lo que existe es bastante caro.

Finalmente, se puede concluir, que la opción más sensata sería readaptar la red de distribución en BT con CA por una red de distribución híbrida CA/CC en BT. Esta readaptación consistiría en dejar la red de CA como existe, añadiéndole GD en la red de CA en caso de que sea posible, pues así se podría aumentar la carga demandada en momentos puntuales y no se dependería tanto de la red eléctrica. En cuanto al tipo de suministro, en trifásica se obtienen mejores valores en el comportamiento de la red de CA pues se obtiene menos caída de tensión y menores pérdidas de potencia por la línea al poderse emplear cables con secciones más pequeñas que en monofásica y obtener tensiones e intensidades a la salida de cada toma mayores que en monofásica. Además es capaz de dar suministro a más consumidores que en monofásica, ya que cada fase equivale a la red de CA cuando hay suministro

monofásico. Por otro lado, se debería incorporar una red con CC para cargar los VEs y todo equipo que demande este tipo de corriente, de este modo se podría descongestionar la red de CA actual, pudiendo tener los usuarios un suministro de calidad, seguro y flexible.

6.1 Líneas futuras

A pesar de las conclusiones que se han obtenido de este trabajo, se han abierto muchas posibilidades por donde tirar en un futuro, como la readaptación de la red de distribución en BT en una red híbrida con suministro monofásico y fuente de alimentación trifásica, pues con esta readaptación en vez de introducir dos hilos a la red, se readaptarían los cuatro hilos ya existentes, destinando dos para suministro monofásico en la red de CA y los otros dos para la red de CC, pudiendo ser esta opción más económica y rentable en algunas ocasiones como en zonas interurbanas, por ejemplo, donde hay más dificultades de suministro eléctrico.

Otro camino de estudio podría encontrarse en la red de CC, pues aunque se haya determinado como la mejor opción un suministro trifásico en la red de CA con una sección de cable en la red de CC similar a la de la red de CA, esto conllevaría un coste mayor que si el cable tuviera una sección menor. Por tanto, podría ser interesante estudiar la introducción de un cable con menor sección en la red de CC, pues las caídas de tensión con respecto a una sección mayor del cable con este tipo de corriente no varían mucho, pudiendo llegar a conseguir un buen comportamiento la red de CC con este segundo tipo de cable.

Por otro lado, la idea de colocar la GD en la red de CA en vez de en la red de CC es atendiendo al marco energético que se espera en pocos años, si se estudiase a largo plazo, seguramente sería más viable tener GD en la red de CC pues además de los VEs habría más elementos conectados a esta, los cuales no se han considerado en este estudio puesto que actualmente la mayoría de los equipos que necesitan CC traen un rectificador de corriente ya incorporado. Esto podría ser una línea de estudio cuando este más insertado en la sociedad la red híbrida.

Además de las líneas futuras expuestas con respecto al trabajo que se ha realizado, la readaptación de la red de distribución en BT en una red híbrida CA/CC podría presentar en un futuro grandes avances en otros campos que estén relacionados con la red de distribución. Uno de estos campos serían los equipos de almacenamiento de energía eléctrica, ya que, de esta forma se podría almacenar la energía obtenida con GD sin necesidad de desperdiciarla o sin tener que estar condicionado su uso por el momento del día en el que se desee disponer de ella.

Por otra parte, esta readaptación de la red de distribución en BT en una red híbrida favorecería al cambio de los vehículos convencionales por VEs, por lo que generaría un aumento en la creación de estaciones de carga. En las estaciones de carga sería rentable disponer de una toma directa de carga rápida con CC y si fuera viable con GD, de este modo se cargarían los VEs con energía limpia pues se obtendría mediante paneles fotovoltaicos, descarbonizándose de este modo el planeta.

Por último, a pesar de la mejora que supone la readaptación de la red de distribución en BT actual en una red híbrida CA/CC, si se le incorporase equipos electrónicos se podría optimizar aún más la red híbrida ya que se tendría un mayor control sobre esta. Por ello, otro campo donde habrá grandes avances en el futuro será en equipos electrónicos que puedan supervisar y controlar el comportamiento de la red de distribución en BT como los Smart Meter, con el fin de llegar a tener Smart Grid.

7 BIBLIOGRAFÍA

- [1] “REE Transición energética.” <https://www.ree.es/es/red21/un-papel-protagonista-en-la-transicion-energetica>.
- [2] IRENA, “REmap: Roadmap for a Renewable Energy Future, 2016 Edition.,” p. 172, 2016, doi: 10.1017/CBO9781107415324.004.
- [3] IRENA, “Acelerando la transformación energética mundial,” *REpensando la Energía 2017*, p. 12, 2017.
- [4] “REE Simulador Recarga Vehículo Eléctrico.” <https://www.ree.es/sites/all/SimuladorVE/simulador.php>.
- [5] “Distribución Eficiente de Energía Eléctrica en Baja Tensión Mediante Redes Mixtas AC/DC, con referencia ENE2017-84813-R.”
- [6] *Reglamento electrotécnico para baja tensión e instrucciones técnicas complementarias (itc) bt 01 a bt 51.* .
- [7] ITC-BT-10, *Guía técnica de Aplicación: Instalaciones de enlace Previsión de cargas para suministros de baja tensión*. 2014, pp. 1–6.
- [8] MEIC, *Guía técnica de aplicación de la ITC-BT 52. INSTALACIONES CON FINES ESPECIALES: INFRAESTRUCTURA PARA LA RECARGA DE VEHÍCULOS ELÉCTRICOS*. 2017, pp. 1–46.
- [9] BOE, *RESOLUCIÓN de 8 de septiembre de 2006, de la Dirección General de Política Energética y Minas, por la que se modifica la de 14 de marzo de 2006, por la que se establece la tabla de potencias normalizadas para todos los suministros en baja tensión*. 2006, pp. 33821–33821.
- [10] P. Tipo, D. E. L. Subterránea, and D. E. B. Tensión, “Mt 2.51.01,” *IBERDROLA Distrib. ELÉCTRICA*, 2013.
- [11] Ministerio de Ciencia y Tecnología, *ITC-BT-11: Redes de distribución de energía eléctrica. Acometidas*. 2002, pp. 1–4.

8 ANEXO

En este Anexo están recogidas todas las tablas con los valores de tensión de salida, intensidad y potencia de salida obtenidos con el Simulink para la red de distribución en BT en los distintos escenarios de estudio. Además, también se encuentran las tablas que recogen los resultados de caída de tensión y pérdida de potencia por línea ocasionada en los seis escenarios de estudio para el caso monofásico y el caso trifásico.

8.1 Caso monofásico (Caso 1)

Los resultados mostrados son para los nudos 8, 9, 10, 11 y 12 ya que es donde se encuentran las cargas y los finales de línea de la red. Para calcular la caída de tensión y las pérdidas de potencia en la línea se han utilizado las siguientes fórmulas en cada situación:

$$\Delta V = \frac{V_e - V_r}{V_e} \times 100$$

$$P_{\text{loss}} = \sum R \cdot |I|^2$$

$$*Q_{\text{loss}} = \sum X \cdot |I|^2$$

ΔV : Caída de tensión (%)

P_{loss} : Pérdida de potencia activa en la línea (W)

Q_{loss} : Pérdida de potencia reactiva en la línea (VAr)

*Las pérdidas de potencia reactiva en la línea sólo se dan en la red de AC.

8.1.1 Red de distribución en BT actual con carga equivalente a vivienda (escenario 0)

Los resultados obtenidos en Simulink para la red de distribución en BT con CA y con cargas equivalentes a las de una vivienda en cada nudo son las de la Tabla 8-1.

Tras los parámetros obtenidos para realizar los cálculos, obteniendo la intensidad que circula por los tramos de la línea principal y teniendo en cuenta la resistencia e inductancia de los cables para CA, Tabla 2-1, se saca los valores de la Tabla 8-2. Se ve que como en los nudos 12 y 10, que son en los que hay más carga, las pérdidas de potencia activa y reactiva generadas por la línea son mayores que en el resto de nudos.

Nudo	Tensión de salida (V)	Intensidad (A)	Potencia Activa (W)	Potencia Reactiva (VAr)
Cabeza	230,0	106,2	24.250	8.098
12	228,2	31,08	6.738	2.217
11	222,2	15,13	3.194	1051
10	221,0	30,10	6.319	2.079
9	219,8	14,97	3.126	1028
8	219,3	14,93	3.110	1023

Tabla 8-1. Resultados Simulink red de distribución en BT actual (escenario 0)

Nudo	Caída de tensión (%)	Pérdida línea Potencia Activa (W)	Pérdida línea Potencia Reactiva (VAr)
12	0,78	362,09	124,44
11	3,39	266,50	86,40
10	3,91	552,38	223,32
9	4,43	287,95	131,02
8	4,65	295,35	134,82

Tabla 8-2. Resultados de los cálculos escenario 0 caso monofásico

8.1.2 Escenario 1: red CA con carga de vivienda y VE

Los resultados obtenidos en Simulink para la red de distribución en BT con CA y con cargas equivalentes a las de una vivienda junto con VE son las de la Tabla 8-3.

Una vez se conocen las tensiones e intensidades de salida de la red de distribución, se puede proceder a calcular el resto de parámetros necesarios para ver el funcionamiento de la red de CA, que es la que actualmente hay en las viviendas, pero añadiéndole en este escenario la carga de los VEs a la de las viviendas, Tabla 8-4.

Nudo	Tensión de salida (V)	Intensidad (A)	Potencia Activa (W)	Potencia Reactiva (VAr)
Cabeza	230,0	196,50	44.530	15.020
12	215,8	58,78	12.050	3.957
11	205,0	27,91	5.436	1.784
10	202,9	55,26	10.650	3.497
9	200,8	27,34	5.217	1.712
8	199,8	27,21	5.165	1.695

Tabla 8-3. Resultados Simulink escenario 1 caso monofásico

Nudo	Caída de tensión (%)	Pérdida línea Potencia Activa (W)	Pérdida línea Potencia Reactiva (VAr)
12	6,17	1.261,53	428,30
11	10,87	907,45	294,30
10	11,78	1.869,90	756,76
9	12,70	971,52	442,56
8	13,13	995,64	455,11

Tabla 8-4. Resultados de los cálculos escenario 1 caso monofásico

8.1.3 Escenario 2: red CA con carga equivalente a vivienda junto con VE junto con GD

Si al escenario 1 expuesto anteriormente se le añade GD, los valores de tensión e intensidad a la salida de esta mejoran pues la red de CA no tiene que aportar toda la demanda de potencia que hay, Tabla 8-5. Con esto se pretende comprobar si la red actual de CA con VE y vivienda, si se podría evitar que se saturase al añadirle GD.

Al aumentar la tensión y disminuir la intensidad cuando hay GD, disminuye la caída de tensión y las pérdidas de potencia ocasionadas por la impedancia del cable. A pesar de esto, la caída de tensión generalmente es mayor de 5%, por lo que seguiría teniendo problemas la red al no cumplir el criterio de máxima caída de tensión establecido por la empresa distribuidora [10], Tabla 8-6.

Nudo	Tensión de salida (V)	Intensidad (A)	Potencia Activa (W)	Potencia Reactiva (VAr)
Cabeza	230,0	128,90	26.890	15.140
12	224,4	37,95	7.363	4.277
11	217,3	18,38	3.454	2.006
10	215,6	36,47	6.799	3.949
9	214,0	18,10	3.349	1.945
8	213,3	18,04	3.328	1.933

Tabla 8-5. Resultados Simulink escenario 2 caso monofásico

Nudo	Caída de tensión (%)	Pérdida línea Potencia Activa (W)	Pérdida línea Potencia Reactiva (VAr)
12	2,43	535,96	183,58
11	5,52	392,65	127,19
10	6,26	811,44	328,11
9	6,96	422,46	192,29
8	7,26	433,20	197,83

Tabla 8-6. Resultados de los cálculos escenario 2 caso monofásico

Con los dos escenarios realizados en la red de distribución en BT con CA con carga de VE y vivienda, se comprueba que la red de CA que hoy en día hay en las casas no sería capaz de soportar de forma eficiente la carga demandada por los VEs y viviendas conjuntamente, teniéndose que buscar alternativas para solucionar esto ya que cada vez hay una implementación mayor de los VEs en la sociedad. Debido a esto, se ha propuesto como posible solución añadir una red con CC a la red de CA que ya hay, teniendo así una red híbrida CA/CC. Esto se va a estudiar en los escenarios 3, 4 y 5.

8.1.4 Red híbrida. Configuración 1 para la red de CC

A partir de ahora, se considera en las simulaciones dos redes, una red con CA cuya carga equivale a la de la vivienda y una red con CC con una carga idéntica a la de los VEs. Esta disposición de redes se encuentra en los escenarios 3, 4 y 5. Para la red de CC hay dos configuraciones en función de la sección del cable, teniendo que diferenciarlas ya que tienen pérdidas de línea diferente debido a ello.

8.1.4.1 Escenario 3: red de CA con carga de vivienda y red de CC con carga de VE

Los parámetros que definen este escenario están recogidos en la Tabla 8-7. En este caso no hay GD en la red de CC ni en la red de CA. En la parte de CC se va a tener en esta ocasión la resistencia de la Tabla 2-2.

Tras realizar los cálculos de caída de tensión y pérdida de potencia en línea para el escenario 3, quedan recogidos los resultados en la Tabla 8-8.

Corriente	Nudo	Tensión de salida (V)	Intensidad (A)	Potencia Activa (W)	Potencia Reactiva (VAr)
CA	Cabeza	230,0	106,30	24.280	8.109
	12	228,4	31,10	6.746	2.219
	11	222,3	15,14	3.198	1052
	10	221,2	30,12	6.327	2.082
	9	220,0	14,98	3.130	1030
	8	219,4	14,94	3.114	1025
CC	Cabeza	730,0	5,923	4.324	-
	12	726,9	1,688	1.227	-
	11	725,6	0,845	613,3	-
	10	724,3	1,694	1.227	-
	9	723,2	0,848	613,3	-
	8	723,0	0,848	613,3	-

Tabla 8-7. Resultados Simulink escenario 3 caso monofásico (opción 1 de la red de CC)

Corriente	Nudo	Caída de tensión (%)	Pérdida línea Potencia Activa (W)	Pérdida línea Potencia Reactiva (VAr)
CA	12	0,70	362,68	124,66
	11	3,35	266,92	86,55
	10	3,83	553,24	223,68
	9	4,35	288,40	131,23
	8	4,61	295,81	135,03
CC	12	0,42	2,68	-
	11	0,60	1,88	-
	10	0,78	4,91	-
	9	0,93	2,90	-
	8	0,96	2,98	-

Tabla 8-8. Resultados de los cálculos escenario 3 caso monofásica (opción 1 de la red de CC)

8.1.4.2 Escenario 4: red de CA con carga de vivienda junto con GD y red de CC con carga de VE

Dentro de la red híbrida, al incluir la GD en la red de CA, cambian las potencias activas introducidas en Simulink para esta red, por lo que se obtienen resultados después de simular distintos en el lado de CA con respecto a cuando no existe GD, Tabla 8-9. Esto hace que las pérdidas de potencia activa y reactiva generadas por la línea de CA sean menores que cuando no hay GD, al igual que la caída de tensión, Tabla 8-10. Por tanto, se mejora notablemente el comportamiento de la red de CA, siendo más eficiente y por consiguiente, da una respuesta mejor en caso de que haya alguna perturbación. La red de CC se mantiene igual ya que no se le ha realizado ninguna modificación.

Corriente	Nudo	Tensión de salida (V)	Intensidad (A)	Potencia Activa (W)	Potencia Reactiva (VAr)
CA	Cabeza	230,0	36,180	3.217,0	7.677
	12	227,2	10,400	871,4	2.198
	11	226,0	5,173	430,8	1.087
	10	225,3	10,320	856,8	2.161
	9	224,8	5,146	426,3	1.075
	8	224,7	5,143	425,8	1.074
CC	Cabeza	730,0	5,923	4.324,0	-
	12	726,8	1,688	1.227,0	-
	11	725,6	0,845	613,3	-
	10	724,2	1,694	1.227,0	-
	9	723,2	0,848	613,3	-
	8	723,0	0,848	613,3	-

Tabla 8-9. Resultados Simulink escenario 4 caso monofásico (opción 1 de la red de CC)

Corriente	Nudo	Caída de tensión (%)	Pérdida línea Potencia Activa (W)	Pérdida línea Potencia Reactiva (VAr)
CA	12	1,22	41,44	14,38
	11	1,74	31,09	10,07
	10	2,04	64,68	26,12
	9	2,26	33,78	15,36
	8	2,30	34,68	15,81
CC	12	0,44	2,68	-
	11	0,60	1,88	-
	10	0,79	4,91	-
	9	0,94	2,90	-
	8	0,96	2,98	-

Tabla 8-10. Resultados cálculos escenario 4 caso monofásico (opción 1 de la red de CC)

8.1.4.3 Escenario 5: red de CA con carga de vivienda y red de CC con carga de VE junto con GD

Para el escenario 5, al colocar la GD en la red de CC, cambia la potencia activa introducida en el Simulink para esta red, por lo que también varían las tensiones e intensidades obtenidas en el lado de CC, Tabla 8-11, con respecto a cuando no hay GD en la red de CC. La parte de la red que lleva CA tiene las mismas tensiones, intensidades y potencias por nudo que en el escenario 3 porque no se ha realizado ninguna modificación en la red de CA, manteniendo el mismo número de viviendas y VEs en cada toma.

Con las tensiones e intensidades obtenidas en Simulink, se realizan los cálculos necesarios para medir la eficiencia de la configuración de CC que tiene la red en este escenario, Tabla 8-12, la cual es mayor al haber GD en el lado de CC pues compensa un poco la demanda de energía que requiere de la red eléctrica, siendo este caso más favorable para la parte de CC que el obtenido en el escenario 3 y 4 de estudio, donde se utiliza el mismo cable en CC pero no tienen GD.

Corriente	Nudo	Tensión de salida (V)	Intensidad (A)	Potencia Activa (W)	Potencia Reactiva (VAr)
CA	Cabeza	230,0	106,20	24.260	8.100
	12	228,2	31,08	6.739	2.217
	11	222,2	15,13	3.194	1051
	10	221,0	30,10	6.321	2.080
	9	219,9	14,97	3.127	1029
	8	219,3	14,93	3.111	1024
CC	Cabeza	730,0	1,088	794,0	-
	12	729,4	0,311	226,7	-
	11	729,2	0,155	113,3	-
	10	729,0	0,311	226,7	-
	9	728,8	0,156	113,3	-
	8	728,7	0,156	113,3	-

Tabla 8-11. Resultados Simulink escenario 5 caso monofásico (opción 1 de la red de CC)

Corriente	Nudo	Caída de tensión (%)	Pérdida línea Potencia Activa (W)	Pérdida línea Potencia Reactiva (VAr)
CA	12	0,78	362,09	124,44
	11	3,39	266,51	86,41
	10	3,91	552,44	223,35
	9	4,39	288,01	131,05
	8	4,65	295,41	134,85
CC	12	0,08	0,09	-
	11	0,11	0,06	-
	10	0,14	0,17	-
	9	0,16	0,10	-
	8	0,18	0,10	-

Tabla 8-12. Resultados de los cálculos escenario 5 caso monofásico (opción 1 de la red de CC)

8.1.5 Configuración 2 para la red de CC

Al igual que en la configuración 1 para la red de CC, ahora hay dos redes, una con CC y otra con CC, teniendo la red de CC con la nueva configuración una sección de cable mayor que la que tiene la red de CC de la configuración 1, correspondiendo la resistencia del cable a la recogida en la Tabla 2-3.

Al tener en este caso la red de CC una sección mayor del cable, las pérdidas de potencia activa y la caída de tensión son menores que en la configuración 1 de la red de CC.

La red de CA en este caso no se le ha realizado ninguna modificación, por lo que sigue siendo una representación de la red de distribución en BT que existe actualmente, habiendo dos viviendas en los nudos 12 y 10, y una vivienda en los nudos 11, 9 y 8, como anteriormente se ha comentado.

8.1.5.1 Escenario 3: red de CA con carga de vivienda y red de CC con carga de VE

Los valores de tensión e intensidad obtenidos en el Simulink para este escenario están recogidos en la Tabla 8-13. Con estos parámetros se realizan los cálculos de caída de tensión y pérdida de potencia en línea para conocer el comportamiento que tiene la red de CA y la red de CC con estas características, recogidos los resultados en la Tabla 8-14.

Corriente	Nudo	Tensión de salida (V)	Intensidad (A)	Potencia Activa (W)	Potencia Reactiva (VAr)
CA	Cabeza	230,0	106,30	24.280	8.109
	12	228,4	31,10	6.746	2.219
	11	222,3	15,14	3.198	1052
	10	221,2	30,12	6.327	2.082
	9	220,0	14,98	3.130	1030
	8	219,4	14,94	3.114	1025
AC	Cabeza	730,0	5,898	4.305	-
	12	728,8	1,683	1.227,0	-
	11	728,3	0,842	613,3	-
	10	727,7	1,686	1.227,0	-
	9	727,3	0,843	613,3	-
	8	727,2	0,843	613,3	-

Tabla 8-13. Resultados Simulink escenarios 3 caso monofásico (opción 2 de la red de CC)

Corriente	Nudo	Caída de tensión (%)	Pérdida línea Potencia Activa (W)	Pérdida línea Potencia Reactiva (VAr)
CA	12	0,70	343,31	114,97
	11	3,35	257,23	81,70
	10	3,83	533,86	213,99
	9	4,35	278,71	126,38
	8	4,61	285,45	129,85
CC	12	0,16	1,06	-
	11	0,23	0,74	-
	10	0,32	1,94	-
	9	0,37	1,15	-
	8	0,38	1,18	-

Tabla 8-14. Resultados cálculos escenarios 3 caso monofásico (opción 2 de la red de CC)

8.1.5.2 Escenario 4: red de CA con carga de vivienda junto con GD y red de CC con carga de VE

En Simulink se han introducido los mismos valores de potencia activa y reactiva que en el escenario 4 de la configuración 1 de la red de CC porque en ambos casos hay GD en el lado de CA, variando únicamente los resultados obtenidos a causa de la sección del cable de la red de CC, Tabla 8-15 Tabla 8-15.

Con estos valores se calcula la caída de tensión y pérdida de potencia ocasionada en la línea, siendo estos valores los recogidos en la Tabla 8-16. Al colocar GD en la red de CA, mejora la caída de tensión para la red de CA pues se alcanza más tensión en cada nudo, siendo por tanto menor la diferencia de tensiones entre la cabeza de la red y los extremos finales. A pesar de que mejora la red de CA, la red de CC se mantiene constante con respecto al escenario 3.

Corriente	Nudo	Tensión de salida (V)	Intensidad (A)	Potencia Activa (W)	Potencia Reactiva (VAr)
CA	Cabeza	230,0	36,18	3.217	7.677
	12	227,2	10,40	871,1	2.197
	11	226,0	5,17	430,8	1.087
	10	225,3	10,32	856,8	2.161
	9	224,8	5,15	426,4	1.075
	8	224,7	5,14	425,8	1.074
CC	Cabeza	730,0	5,898	4.305,0	-
	12	728,7	1,683	1.227,0	-
	11	728,2	0,842	613,3	-
	10	727,7	1,686	1.227,0	-
	9	727,3	0,843	613,3	-
	8	727,2	0,843	613,3	-

Tabla 8-15. Resultados Simulink escenario 4 caso monofásico (opción 2 de la red de CC)

Corriente	Nudo	Caída de tensión (%)	Pérdida línea Potencia Activa (W)	Pérdida línea Potencia Reactiva (VAr)
CA	12	1,22	41,44	14,38
	11	1,74	31,09	10,07
	10	2,04	64,68	26,12
	9	2,26	33,78	15,36
	8	2,30	34,68	15,81
CC	12	0,18	1,06	-
	11	0,25	0,74	-
	10	0,32	1,94	-
	9	0,37	1,15	-
	8	0,38	1,18	-

Tabla 8-16. Resultados de los cálculos escenario 4 caso monofásico (opción 2 de la red de CC)

8.1.5.3 Escenario 5: red de CA con carga de vivienda y red de CC con carga de VE junto con GD

Los parámetros que se obtienen del Simulink están recogidos en la Tabla 8-17. En este caso, al igual que en el escenario 5 de la otra configuración de CC que se está estudiando, hay GD en la red de CC, manteniéndose la red de CA sin ningún cambio, teniendo esta sólo la carga de las viviendas como en la actualidad se encuentra. Por tanto, en la red de CC se tendrá la carga de los VEs, que reciben el apoyo de la GD para el suministro de energía eléctrica. Esto hace que la caída de tensión disminuya y las pérdidas de potencia por la línea también. Además, si se compara con la configuración 1 de la red de CC, en esta nueva configuración la red tiene un comportamiento mejor, por lo que es más segura que la anterior. Aún así, en ambos casos la red de CC tiene un comportamiento bastante bueno ya que se alcanza una caída de tensión menor del 5%, siendo en este caso la caída de tensión inferior a 0,1%, Tabla 8-18, lo cual la hace casi ideal pues son mínimas las pérdidas que hay con dicha sección de cable.

Corriente	Nudo	Tensión de salida (V)	Intensidad (A)	Potencia Activa (W)	Potencia Reactiva (VAr)
CA	Cabeza	230,0	106,20	24.260	8.103
	12	228,3	31,09	6.741	2.218
	11	222,3	15,14	3.195	1051
	10	221,1	30,11	6.323	2.080
	9	219,9	14,97	3.128	1029
	8	219,3	14,94	3.112	1024
CC	Cabeza	730,0	2,459	1.795	-
	12	729,5	0,996	726,7	-
	11	729,4	0,155	113,3	-
	10	729,1	0,997	726,7	-
	9	729,1	0,155	113,3	-
	8	729,1	0,156	113,3	-

Tabla 8-17. Resultados Simulink escenario 5 caso monofásico (opción 2 de la red de CC)

Corriente	Nudo	Caída de tensión (%)	Pérdida línea Activa (W)	Pérdida línea reactiva (VAr)
CA	12	0,74	362,18	124,45
	11	3,35	266,68	86,43
	10	3,87	552,59	223,39
	9	4,39	288,04	131,07
	8	4,65	295,50	134,87
CC	12	0,07	0,20	-
	11	0,08	0,11	-
	10	0,12	0,33	-
	9	0,12	0,15	-
	8	0,12	0,15	-

Tabla 8-18. Resultados cálculos escenario 5 caso monofásico (opción 2 de la red de CC)

8.2 Caso trifásico (Caso 2)

Se van a realizar los mismos cálculos y tomar los mismo criterios que los que se han utilizado en el caso monofásico, variando con respecto al caso anterior la potencia activa y reactiva introducida en Simulink para la red de CA y la potencia activa introducida para la red de CC, ya que al haber más fases ahora en CA, se ha aumentado el número de viviendas y VEs en cada nudo, aumentando por tanto la carga demandada del mismo. Esto se verá reflejado en los valores que se obtengan tras realizar las simulaciones y tras los cálculos con los que se obtiene la caída de tensión y la pérdida de potencia generada en la línea, empleándose las mismas ecuaciones que en el caso monofásico para conseguirlos.

$$\Delta V = \frac{V_e - V_r}{V_e} \times 100$$

$$P_{\text{loss}} = \sum R \cdot |I|^2$$

$$*Q_{\text{loss}} = \sum X \cdot |I|^2$$

ΔV : Caída de tensión (%)

P_{loss} : Pérdida de potencia activa en la línea (W)

Q_{loss} : Pérdida de potencia reactiva en la línea (VAr)

*Las pérdidas de potencia reactiva en la línea sólo se dan en la red de AC.

8.2.1 Red de distribución doméstica en BT con CA (escenario 0)

Una vivienda normal, que tenga un suministro trifásico, tendrá un comportamiento y unas tensiones similares a los conseguidos después de realizar la simulación para esta situación, Tabla 8-19.

Nudo	Tensión de salida (V)	Intensidad (A)	Potencia Activa (W)	Potencia Reactiva (VAr)
Cabeza	230,0	100,50	68.870	22.970
12	229,1	28,08	18.340	6.025
11	222,8	15,17	9.631	3.169
10	222,2	27,24	17.250	5.667
9	220,6	15,02	9.446	3.108
8	220,1	14,99	9.398	3.092

Tabla 8-19. Resultados Simulink escenario 0 caso trifásico

Los valores que aparecen en la Tabla 8-20 corresponden a la caída de tensión y potencias típicas de una vivienda.

Nudo	Caída de tensión (%)	Pérdida línea Potencia Activa (W)	Pérdida línea Potencia Reactiva (VAr)
12	0,39	312,93	110,26
11	3,13	252,96	79,38
10	3,39	488,82	201,14
9	4,09	268,86	121,38
8	4,30	276,37	125,21

Tabla 8-20. Resultados de los cálculos escenario 0 caso trifásico

8.2.2 Escenario 1: red de CA con carga de vivienda junto con VE

En este escenario se intenta saturar la red de distribución en BT actual al añadirle la carga de vivienda y VE en una misma toma de conexión, teniendo así la red de CA que soportar el doble de potencia que para la que ha sido diseñada, obteniendo unas tensiones e intensidades al final de la línea recogidas en la Tabla 8-21 y unos resultados tras los cálculos recogidos en la Tabla 8-22.

Nudo	Tensión de salida (V)	Intensidad (A)	Potencia Activa (W)	Potencia Reactiva (VAr)
Cabeza	230,0	186,50	126.900	42.800
12	217,5	53,31	33.050	10.860
11	205,9	28,04	16.460	5.404
10	205,0	50,25	29.360	9.646
9	202,1	27,52	15.860	5.205
8	201,1	27,38	15.700	5.153

Tabla 8-21. Resultados Simulink escenario 1 trifásica (Red AC vivienda y VE)

Nudo	Caída de tensión (%)	Pérdida línea activa (W)	Pérdida línea reactiva (VAr)
12	5,43	1.096,38	381,65
11	10,48	865,73	271,92
10	10,87	1.667,05	686,27
9	12,13	912,68	412,54
8	12,57	937,03	425,24

Tabla 8-22. Resultados de los cálculos escenario 1 trifásica (Red AC vivienda y VE)

8.2.3 Escenario 2: red de CA con carga de vivienda junto con VE junto con GD

Para probar si los resultados del escenario 1 se pueden mejorar se le añade GD a la red de CA, con la intención de conseguir unos datos similares a los que actualmente existen sin VEs, obteniéndose los valores de la Tabla 8-23 y de la Tabla 8-24, disminuyendo la caída de tensión pero todavía teniendo valores superiores al 5%, por lo que, no soluciona el problema que causarían los VEs en la red.

Nudo	Tensión de salida (V)	Intensidad (A)	Potencia activa (W)	Potencia reactiva (VAr)
Cabeza	230,0	118,20	73.090	43.190
12	226,2	32,26	18.480	11.740
11	218,4	18,47	10.470	6.079
10	218,0	31,09	17.160	10.900
9	215,5	18,22	10.190	5.916
8	214,8	18,16	10.120	5.879

Tabla 8-23. Resultados Simulink escenario 2 caso trifásico

Nudo	Caída de tensión (%)	Pérdida línea activa (W)	Pérdida línea reactiva (VAr)
12	5,87	389,56	138,94
11	9,62	331,94	102,05
10	9,83	613,18	255,00
9	11,11	348,01	156,41
8	11,43	357,97	161,54

Tabla 8-24. Resultados de los cálculos escenario 2 caso trifásico

8.2.4 Configuración 1 para la red de CC

Al igual que en el caso monofásico, hay dos configuraciones para la red de CC pues varía la sección del cable. En el caso trifásico, hay más cargas en la red de CC que antes ya que aumenta el número de fases en la red de CA al usarse trifásica. Como se considera que hay tantos VEs como viviendas, aumenta la carga que debe suministrar la red de CC pues aumenta el número de viviendas en la red de CA.

8.2.4.1 Escenario 3: red de CA con carga de vivienda y red de CC con carga de VE

Para este escenario se consiguen las tensiones e intensidades recogidas en la Tabla 8-25.

Corriente	Nudo	Tensión de salida (V)	Intensidad (A)	Potencia Activa (W)	Potencia Reactiva (VAr)
CA	Cabeza	230,0	101,60	69.300	24.500
	12	229,4	28,44	18.380	6.719
	11	228,5	15,56	10.130	3.333
	10	222,4	27,57	17.280	6.317
	9	220,8	15,04	9.463	3.113
	8	220,3	15,00	9.415	3.097
CC	Cabeza	730,0	18,030	13.170	-
	12	720,3	5,109	3.680	-
	11	716,5	2,568	1.840	-
	10	712,3	5,166	3.680	-
	9	709,1	2,595	1.840	-
	8	708,5	2,597	1.840	-

Tabla 8-25. Resultados Simulink escenario 3 caso trifásico (opción 1 de la red de CC)

De igual modo que en el resto de escenarios expuestos hasta ahora se realizan los cálculos para conocer el comportamiento de la red híbrida CA/CC, Tabla 8-26.

Corriente	Nudo	Caída de tensión (%)	Pérdida línea Potencia Activa (W)	Pérdida línea Potencia Reactiva (VAr)
CA	12	0,26	320,26	112,73
	11	0,65	262,06	81,47
	10	3,30	498,68	205,01
	9	4,00	272,64	123,24
	8	4,22	280,11	127,07
CC	12	1,33	24,83	-
	11	1,85	17,43	-
	10	2,42	45,67	-
	9	2,86	26,98	-
	8	2,95	27,79	-

Tabla 8-26. Resultados de los cálculos escenario 3 caso trifásico (opción 1 de la red de CC)

8.2.4.2 Escenario 4: red de CA con carga de vivienda junto con GD y red de CC con carga de VE

Partiendo de los resultados de la Tabla 8-25 y la Tabla 8-26, se plantea el escenario 4, en el que la única diferencia con respecto a lo anteriormente calculado en el escenario 3 es que se le añade GD en la red de CA, de forma que ayude en el aporte de energía eléctrica requerida por los usuarios de esta, obteniendo los valores de la Tabla 8-27. A su vez, al aportar GD, la potencia activa que tiene que dar la red eléctrica a las viviendas es menor, por lo que, disminuyen las pérdidas de potencia por la línea, aumentando así la tensión que llega al final de las líneas secundarias (UG3), como se puede observar en la Tabla 8-28.

Corriente	Nudo	Tensión de salida (V)	Intensidad (A)	Potencia Potencia Activa (W)	Potencia Potencia Reactiva (VAr)
CA	Cabeza	230,0	34,600	5.671,0	23.210
	12	228,2	9,756	615,3	6.652
	11	226,6	5,188	1.300,0	3.279
	10	226,6	9,686	606,6	6.557
	9	225,7	5,166	1.289,0	3.251
	8	225,5	5,162	1.287,0	3.247
CC	Cabeza	730,0	18,030	13.170	-
	12	720,3	5,109	3.680	-
	11	716,5	2,568	1.840	-
	10	712,3	5,166	3.680	-
	9	709,1	2,595	1.840	-
	8	708,5	2,597	1.840	-

Tabla 8-27. Resultados Simulink escenario 4 caso trifásico (opción 1 de la red de CC)

Corriente	Nudo	Caída de tensión (%)	Pérdida línea Activa (W)	Pérdida línea reactiva (VAr)
CA	12	0,87	37,35	13,10
	11	1,56	29,81	9,39
	10	1,56	58,96	24,01
	9	1,95	31,93	14,42
	8	2,04	32,83	14,88
CC	12	1,33	24,83	-
	11	1,85	17,43	-
	10	2,42	45,67	-
	9	2,86	26,98	-
	8	2,95	27,79	-

Tabla 8-28. Resultados cálculos escenario 4 caso trifásico (opción 1 de la red de CC)

8.2.4.3 Escenario 5: red de CA con carga de vivienda y red de CC con carga de VE junto con GD

En este escenario la GD se encuentra en la red de CC junto con los VEs en vez de estar situada en la de CA, como en el escenario 4. Ahora las tensiones obtenidas van a ser en la red de CA prácticamente las mismas que para el escenario 3, variando principalmente las de la red CC al incorporar GD, Tabla 8-29.

Corriente	Nudo	Tensión de salida (V)	Intensidad (A)	Potencia Activa (W)	Potencia Reactiva (VAr)
CA	Cabeza	230,0	101,50	69.110	24.430
	12	229,1	28,40	18.330	6.701
	11	228,2	15,54	10.100	3.324
	10	222,1	27,54	17.230	6.299
	9	220,5	15,02	9.437	3.105
	8	220,0	14,98	9.389	3.089
CC	Cabeza	730,0	5,153	3.761	-
	12	727,2	1,870	1.360	-
	11	726,4	0,468	340	-
	10	725,0	1,876	1.360	-
	9	724,6	0,469	340	-
	8	724,5	0,469	340	-

Tabla 8-29. Resultados Simulink escenario 5 caso trifásico (opción 1 de la red de CC)

Como se puede apreciar en la Tabla 8-30, ahora hay un comportamiento mejor de la red de CC, teniendo una caída de tensión aún menor que antes, no llegando en este caso ni a un 1%. Además, también disminuyen las pérdidas de potencia activa, por lo que en definitiva mejora la red entera ya que esto significa que da un suministro de corriente eléctrica de mayor calidad.

Corriente	Nudo	Caída de tensión (%)	Pérdida línea Potencia Activa (W)	Pérdida línea Potencia Reactiva (VAr)
CA	12	0,39	319,53	112,50
	11	0,78	261,44	81,29
	10	3,43	497,53	204,53
	9	4,13	271,97	122,94
	8	4,35	279,43	126,76
CC	12	0,38	0,75	-
	11	0,49	1,24	-
	10	0,68	3,63	-
	9	0,74	1,81	-
	8	0,75	1,84	-

Tabla 8-30. Resultados de los cálculos escenario 5 caso trifásico (opción 1 de la red de CC)

8.2.5 Configuración 2 para la red de CC

Ocurre lo mismo que en la configuración 1 de la red de CC en el caso trifásico, pero en este caso hay menos pérdidas en la red de CC pues la sección del cable es mayor con respecto a la configuración anterior de esta red, siendo la resistencia del cable de la red de CC y de de la red de CA las de la Tabla 2-3 y de la Tabla 2-1.

8.2.5.1 Escenario 3: red CA con carga de vivienda y red CC con carga de VE

Las tensiones que se obtienen en la salida de UG3 en la red de CC, Tabla 8-31, son casi del mismo valor que las obtenidas en la configuración 1 de la red de CC con GD, lo cual demuestra las ventajas de que el cable tenga una sección mayor, puesto que al aumentar la tensión de salida, disminuye la caída de tensión, como se puede ver en la Tabla 8-32.

Corriente	Nudo	Tensión de salida (V)	Intensidad (A)	Potencia Activa (W)	Potencia Reactiva (VAr)
CA	Cabeza	230,0	101,60	69.300	24.500
	12	229,4	28,44	18.380	6.719
	11	228,5	15,56	10.130	3.333
	10	222,4	27,57	17.280	6.317
	9	220,8	15,04	9.462	3.113
	8	220,3	15,00	9.415	3.097
CC	Cabeza	730,0	17,800	12.990	-
	12	726,2	5,067	3.680	-
	11	724,7	2,539	1.840	-
	10	723,0	5,090	3.680	-
	9	721,8	2,549	1.840	-
	8	721,6	2,550	1.840	-

Tabla 8-31. Resultados Simulink escenarios 3 caso trifásico (opción 2 de la red de CC)

Corriente	Nudo	Caída de tensión (%)	Pérdida línea Potencia Activa (W)	Pérdida línea Potencia Reactiva (VAr)
CA	12	0,26	320,26	112,73
	11	0,65	262,06	81,47
	10	3,30	498,64	204,99
	9	4,00	272,62	123,23
	8	4,22	280,09	127,06
CC	12	0,52	9,67	-
	11	0,73	6,77	-
	10	0,96	17,70	-
	9	1,12	10,44	-
	8	1,15	10,75	-

Tabla 8-32. Resultados cálculos escenarios 3 caso trifásico (opción 2 de la red de CC)

8.2.5.2 Escenario 4: red de CA con carga de vivienda junto con GD y red de CC con carga de VE

Se le va a incorporar GD en la red de CA, sirviendo esto de ayuda a la red eléctrica en el momento de aportar energía a los consumidores, pues no recae todo el peso sobre esta. Además, se mejora las tensiones e intensidad de la red de CA, Tabla 8-33, y por tanto, las caídas de tensión, Tabla 8-34. A pesar de estas mejoras en la red de CA, la red de CC se mantiene igual, sin ninguna modificación, obteniéndose los mismos valores que en el escenario 3 de estudio.

Corriente	Nudo	Tensión de salida (V)	Intensidad (A)	Potencia Activa (W)	Potencia Reactiva (VAr)
CA	Cabeza	230,2	34,60	5.670,0	23.210
	12	228,2	9,756	615,3	6.651
	11	226,6	5,188	1.300,0	3.279
	10	226,6	9,686	606,6	6.557
	9	225,7	5,166	1.289,0	3.251
	8	225,5	5,162	1.287,0	3.247
CC	Cabeza	730,0	17,800	12.990	-
	12	726,2	5,067	3.680	-
	11	724,7	2,539	1.840	-
	10	723,0	5,090	3.680	-
	9	721,8	2,549	1.840	-
	8	721,6	2,550	1.840	-

Tabla 8-33. Resultados Simulink escenario 4 caso trifásico (opción 2 de la red de CC)

Corriente	Nudo	Caída de tensión (%)	Pérdida línea Potencia Activa (W)	Pérdida línea Potencia Reactiva (VAr)
CA	12	0,87	37,35	13,10
	11	1,56	29,81	9,39
	10	1,56	58,96	24,01
	9	1,95	31,93	14,42
	8	2,04	32,83	14,88
CC	12	0,52	9,67	-
	11	0,73	6,77	-
	10	0,96	17,70	-
	9	1,12	10,44	-
	8	1,15	10,75	-

Tabla 8-34. Resultados de los cálculos escenario 4 caso trifásico (opción 2 de la red de CC)

8.2.5.3 Escenario 5: red de CA con carga de vivienda y red de CC con carga de VE junto con GD

En este escenario, la GD se posiciona en la red de CC, dejando la red de CA como se encuentra actualmente en las viviendas, sirviendo únicamente de ayuda para la carga de los VEs, como se ve en la Tabla 8-35, ya que disminuye la potencia activa, como queda reflejado en la tabla. Esto hace que aumente la tensión de salida de la red de CC mejorando, por tanto, la caída de tensión pues disminuye, adquiriendo valores inferiores al 0,5%, como se ve en la Tabla 8-36. Si se compara estos valores con los obtenidos tras los cálculos realizados para la configuración 1 de la red de CC, se aprecia una notable mejoría en la caída de tensión puesto que antes la caída de tensión más pequeña obtenida, cuando hay GD en la red de CC era 0,75% mientras que ahora la más grande es 0,30%. A pesar de ello, en ambos casos, la caída de tensión es inferior al 1% en cualquiera de sus nudos.

La red de CA no experimenta ninguna modificación, por lo que se sigue obteniendo los mismos valores que la red de distribución en BT que hay en las casas ahora, ya que, es la que se está simulando, siendo la caída de tensión en todos los nudos inferior al 5%.

Corriente	Nudo	Tensión de salida (V)	Intensidad (A)	Potencia Activa (W)	Potencia Reactiva (VAr)
CA	Cabeza	230,0	101,50	69.110	24.430
	12	229,1	28,40	18.330	6.701
	11	228,2	15,54	10.100	3.324
	10	222,1	27,54	17.230	6.299
	9	220,5	15,02	9.437	3.105
	8	220,0	14,98	9.389	3.089
CC	Cabeza	730,0	5,135	3.748	-
	12	728,9	1,866	1.360	-
	11	728,6	0,467	340	-
	10	728,0	1,868	1.360	-
	9	727,9	0,467	340	-
	8	727,8	0,467	340	-

Tabla 8-35. Resultados Simulink escenario 5 caso trifásico (opción 2 de la red de CC)

Corriente	Nudo	Caída de tensión (%)	Pérdida línea Potencia Activa (W)	Pérdida línea Potencia Reactiva (VAr)
CA	12	0,39	319,53	362,98
	11	0,78	261,44	81,29
	10	3,43	497,53	204,53
	9	4,13	271,97	122,94
	8	4,35	279,43	126,76
CC	12	0,15	0,86	-
	11	0,19	0,49	-
	10	0,27	1,44	-
	9	0,29	0,72	-
	8	0,30	0,73	-

Tabla 8-36. Resultados cálculos escenario 5 caso trifásico (opción 2 de la red de CC)