

Proyecto Fin de Carrera Ingeniería de la Energía

Análisis del impacto de la puesta a tierra en redes de baja tensión desequilibradas modeladas en OpenDSS

Autor: Jose Lanzas Fernández

Tutores: Francisco de Paula García López

Esther Romero Ramos

**Departamento de Ingeniería Eléctrica
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla**

Sevilla, 2021



Trabajo de Fin de Grado
Grado en Ingeniería de la Energía

Análisis del impacto de la puesta a tierra en redes de baja tensión desequilibradas modeladas en OpenDSS

Autor:

Jose Lanzas Fernández

Tutores:

Francisco de Paula García López

Profesor Ayudante Doctor

Esther Romero Ramos

Catedrática de Universidad

Departamento de Ingeniería Eléctrica
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2021

Trabajo de Fin de Grado: Análisis del impacto de la puesta a tierra en redes de baja tensión desequilibradas modeladas en OpenDSS

Autor: Jose Lanzas Fernández

Tutores: Francisco de Paula Gacía López
Esther Romero Ramos

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

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2021

El Secretario del Tribunal

A mi familia

A mis maestros

Agradecimientos

Este documento, además de ser un trabajo de fin de grado, simboliza el deseado final de un ciclo de mi vida en el que, sin ni siquiera darme cuenta, he madurado mucho hasta convertirme en la persona que soy hoy en día.

No habría logrado cerrar dicho ciclo, ni entregar este proyecto, si no fuese por los valores que me han otorgado, mis familiares y mis buenos amigos, así como el apoyo que me han brindado cuando lo he necesitado.

Agradezco el buen trato que han tenido conmigo mis compañeros de clase. En especial a los compañeros más cercanos, que a su vez se han convertido en amigos con el paso del tiempo y han hecho que los momentos difíciles no lo sean tanto.

En último lugar y no por ello menos importante, al tutor que más tiempo ha dedicado en mí, Paco, por la oportunidad de trabajar con él y por la paciencia que ha tenido que tener conmigo.

La inevitable transición energética hacia las energías limpias, unida al obligado cumplimiento de un uso eficiente del sistema de suministro eléctrico en el que las pérdidas alcancen los mínimos valores posibles, traerá consigo un gran aumento en la inclusión del vehículo eléctrico, así como un desplazamiento hacia un sistema de generación cada vez más distribuida. Paralelamente, las condiciones de operación inherentes a las redes de distribución, hacen que estas se enfrenten constantemente a la problemática de los desequilibrios. Bajo ciertas condiciones de operación, estos factores harán que las redes de distribución incrementen sus niveles de desequilibrio de consumo de cargas entre fases. Todo hace indicar que el sistema de suministro eléctrico debe experimentar una transformación radical para garantizar la calidad del suministro y satisfacer las futuras necesidades energéticas de una sociedad que está en constante evolución

En este proyecto se estudian cinco diferentes topologías o sistemas de puesta a tierra para una red de distribución de baja tensión, cuantificando el orden de magnitud de los efectos causados por los desequilibrios en cada configuración de puesta a tierra.

Abstract

The inevitable energy transition towards clean energies, together with the obligatory compliance with the efficient use of the electricity supply system in which losses reach the minimum possible values, will bring with it a large increase in the inclusion of the electric vehicles, as well as a shift towards an increasingly distributed generation system. At the same time, the inherent operating conditions of distribution networks mean that they are constantly confronted with the problem of imbalance. Under certain operating conditions, these factors will cause distribution networks to increase their levels of load consumption imbalance between phases. All indications are that the electricity supply system must undergo a radical transformation to guarantee the quality of supply and meet the future energy needs of a society that is constantly evolving.

This project studies five different grounding topologies or systems for a low voltage distribution network, quantifying the order of magnitude of the effects caused by unbalance in each grounding configuration.

Índice

| | |
|--|-------------|
| Agradecimientos | ix |
| Resumen | xi |
| Abstract | xiii |
| Índice | xiv |
| Índice de Tablas | xvi |
| Índice de Figuras | xvii |
| 1 Introducción | 1 |
| 1.1 <i>Sistema de suministro eléctrico</i> | 1 |
| 1.1.1 Evolución esperada del sistema energético | 2 |
| 1.1.2 Desequilibrios eléctricos | 4 |
| 1.2 <i>Objetivos del proyecto</i> | 8 |
| 1.3 <i>Estructura del documento</i> | 8 |
| 2 Red de Estudio y Escenarios de Consumo | 11 |
| 2.1 <i>Topología de la Red</i> | 12 |
| 2.2 <i>Parámetros de la Red</i> | 14 |
| 2.2.1. Conductores de la Red | 14 |
| 2.2.2. Datos de los Transformadores | 17 |
| 3 Escenarios de Estudio | 19 |
| 3.1 <i>Configuraciones de Puesta a Tierra para el feeder Comercial</i> | 19 |
| 3.1.1 Casos 1 y 2. Escenario con transformador como único elemento con conexión a tierra | 19 |
| 3.1.2 Casos 3 y 4. Escenario donde los nudos terminales tienen conexión a tierra | 20 |
| 3.1.3 Casos 5 y 6. Escenario donde los nudos bifurcación tienen conexión a tierra | 22 |
| 3.1.4 Casos 7 y 8. Escenario de estudio con todos los nudos puestos a tierra | 23 |
| 3.2 <i>Configuración de mallado de la Red Comercial con la Red Residencial</i> | 25 |
| 3.3 <i>Tipos de desequilibrio</i> | 26 |
| 3.3.1. Escenario de consume perfectamente equilibrado | 26 |
| 3.3.2. Escenario de consumo levemente desequilibrado | 27 |
| 3.3.3. Escenario moderadamente desequilibrado | 29 |
| 3.3.4. Escenario fuertemente desequilibrado | 31 |
| 4 Herramientas de simulación | 37 |

| | | |
|----------|--------------------------------------|-------------------------------|
| 4.1 | <i>OpenDSS</i> | 37 |
| 4.1.1 | Fuente de Tensión | 38 |
| 4.1.2 | Transformador | 38 |
| 4.1.3 | Código de línea | 40 |
| 4.1.4 | Líneas | 40 |
| 4.1.5 | Perfil de carga | 41 |
| 4.1.6 | Cargas | 41 |
| 4.1.7 | Puestas a tierra | 42 |
| 4.1.8 | Método de solución | 43 |
| 4.2 | <i>MatLab</i> | 44 |
| 5 | Resultados de simulación | 46 |
| 5.1 | <i>Definición de KPI's</i> | 46 |
| 5.2 | <i>Discusión de resultados</i> | 48 |
| 5.2.1. | Tensiones | 50 |
| 5.2.2. | Intensidades | 56 |
| 5.2.3. | Síntesis de Resultados | 60 |
| 6 | Conclusiones y Trabajo Futuro | 65 |
| 6.1 | <i>Conclusiones</i> | 65 |
| 6.2 | <i>Trabajo Futuro</i> | 66 |
| | Bibliografía | 12 |
| | Índice de Conceptos | ¡Error! Marcador no definido. |
| | Glosario | ¡Error! Marcador no definido. |

ÍNDICE DE TABLAS

| | |
|--|----|
| Tabla 1-1. Km de Circuito de la Red de Transporte Nacional en 2021 | 1 |
| Tabla 1-2. Km de Línea de la Red de Distribución Nacional en 2018 | 2 |
| Tabla 2-1 Potencia de las Cargas de la Red | 13 |
| Tabla 2-2. Definición de las líneas de la red | 14 |
| Tabla 2-3 Sección de los conductores de la Red | 15 |
| Tabla 2-4. Matrices de impedancia de fase de los conductores | 16 |
| Tabla 2-5. Parámetros del transformador de la Red | 17 |
| Tabla 3-1. Valor de la resistencia de tierra de los casos 1 y 2 | 19 |
| Tabla 3-2. Valor de las resistencias de tierra de los casos 3 y 4 | 20 |
| Tabla 3-3. Valor de las resistencias de tierra de los casos 5 y 6 | 22 |
| Tabla 3-4. Valor de las resistencias de tierra de los casos 7 y 8 | 23 |
| Tabla 3-5. Valor de las resistencias de tierra de los casos 9 y 10 | 25 |
| Tabla 3-6. Resumen del valor de las resistencias de tierra de los casos de estudio | 26 |
| Tabla 3-7. Potencias monofásicas del escenario perfectamente equilibrado | 27 |
| Tabla 3-8. Valor de la potencia monofásica en cada fase del escenario levemente desequilibrado | 28 |
| Tabla 3-9. Valor de la potencia monofásica en cada fase del escenario moderadamente desequilibrado | 30 |
| Tabla 3-10. Valor de la potencia monofásica en cada fase del escenario fuertemente desequilibrado | 32 |
| Tabla 3-11. Tabla guía de las simulaciones | 35 |
| Tabla 5-1- Intensidad Máxima Admisible del feeder Comercial | 48 |
| Tabla 5-2. Pérdidas Totales de Potencia Activa | 48 |
| Tabla 5-3. Pérdidas Totales de Potencia Reactiva | 49 |
| Tabla 5-4. Subtensiones del feeder Comercial | 55 |
| Tabla 5-5. SobreIntensidades del feeder Comercial | 60 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1-1. Diagrama esquematizado del Sistema de suministro eléctrico [2] | 2 |
| Figura 1-2. Evolución de la Estructura de Potencia Instalada Peninsular [MW] | 3 |
| Figura 1-3. Evolución esperada del parque vehicular eléctrico en España [5] | 4 |
| Figura 1-4. Comparación del Diagrama Fasorial de Sistema Equilibrado y Desequilibrado [6] | 5 |
| Figura 1-5. Diagramas Fasoriales de los distintos tipos de desequilibrio [7] | 6 |
| Figura 1-6. Relación entre tensiones y corrientes desbalanceadas [10] | 7 |
| Figura 2-1. Topología de la Red de Distribución de BT de referencia europea definida en [9] | 11 |
| Figura 2-2. Esquema de la Red de BT Objeto de Estudio | 12 |
| Figura 2-3. Perfiles de Carga de la Red | 13 |
| Figura 2-4. Esquema unifilar de los distintos conductores de la Red | 15 |
| Figura 3-1. Esquema de Puesta a Tierra de los Casos 1 y 2 | 20 |
| Figura 3-2. Esquema de Puesta a Tierra de los Casos 3 y 4 | 21 |
| Figura 3-3. Esquema Unifilar del feeder Comercial para los Casos 3 y 4 | 21 |
| Figura 3-4. Esquema Unifilar del feeder Comercial para los Casos 5 y 6 | 22 |
| Figura 3-5. Esquema de Puesta a tierra de los Casos 5 y 6 | 23 |
| Figura 3-6. Esquema de Puesta a Tierra de los Casos 7 y 8 | 23 |
| Figura 3-7. Esquema Unifilar del feeder Comercial para los Casos 7 y 8 | 24 |
| Figura 3-8. Esquema Unifilar de la Red para los Casos 9 y 10 | 25 |
| Figura 3-9. Porcentaje de potencia instalada de cada fase del escenario levemente desequilibrado | 27 |
| Figura 3-10. Potencias monofásicas de cada fase en el escenario levemente desequilibrado | 28 |
| Figura 3-11. Perfil de Potencia del escenario levemente desequilibrado | 29 |
| Figura 3-12. Porcentaje de potencia instalada de cada fase del escenario moderadamente desequilibrado | 29 |
| Figura 3-13. Potencias monofásicas de cada fase en el escenario levemente desequilibrado | 30 |
| Figura 3-14. Perfil de Potencia del escenario moderadamente desequilibrado | 31 |
| Figura 3-15. Porcentaje de potencia instalada de cada fase del escenario moderadamente desequilibrado | 31 |
| Figura 3-16. Potencias monofásicas de cada fase del feeder Comercial en el escenario fuertemente desequilibrado | 33 |
| Figura 3-17. Potencias monofásicas de cada fase del feeder Residencial en el escenario fuertemente desequilibrado | 33 |

| | |
|---|----|
| Figura 3-18. Perfil de Potencia del escenario fuertemente desequilibrado del feeder Comercial | 34 |
| Figura 3-19. Perfil de Potencia del escenario fuertemente desequilibrado de la red | 34 |
| Figura 4-1. Ventana principal de OpenDSS | 37 |
| Figura 5-1. Pérdidas de Potencia Activa | 49 |
| Figura 5-2. Pérdidas de Potencia Reactiva | 49 |
| Figura 5-3. Desequilibrio de Tensión del escenario perfectamente equilibrado para cada caso de estudio | 50 |
| Figura 5-4. Tensión Homopolar del feeder Comercial bajo un escenario equilibrado | 51 |
| Figura 5-5. Tensiones Directas e Inversas del feeder Comercial | 52 |
| Figura 5-6. Tensión del Neutro del feeder Comercial bajo el escenario fuertemente desequilibrado | 52 |
| Figura 5-7. Tensión promedio del feeder Comercial bajo el escenario fuertemente desequilibrado | 54 |
| Figura 5-8. Máxima variación de Tensión diaria del feeder Comercial | 56 |
| Figura 5-9. Desequilibrio de Intensidad del feeder Comercial en el escenario fuertemente desequilibrado | 57 |
| Figura 5-10. Intensidades Homopolares del feeder Comercial en el escenario de desequilibrio fuerte | 58 |
| Figura 5-11. Intensidades de secuencia directa e inversa del feeder Comercial | 58 |
| Figura 5-12. Intensidad del Neutro del feeder Comercial bajo el escenario fuertemente desequilibrado | 59 |
| Figura 5-13. Desequilibrio de intensidad en función del desequilibrio de tensión | 60 |
| Figura 5-14. Reducción de la pendiente de la gráfica $DI = f(DT)$ de cada caso | 61 |
| Figura 5-15. Reducción de la pendiente de la gráfica $T_N = f(DT)$ de cada caso | 62 |
| Figura 5-16. Reducción de la pendiente de la gráfica $IN = f(DI)$ de cada caso | 63 |

Notación

| | |
|-----|------------------------------|
| REE | Red Eléctrica de España |
| BT | Baja Tensión |
| MT | Media Tensión |
| PT | Puestas a Tierra |
| LV | Levemente Desequilibrado |
| MD | Moderadamente Desequilibrado |
| FD | Fuertemente Desequilibrado |

1 INTRODUCCIÓN

El sistema eléctrico global está inmerso en un proceso continuo de cambio, ya que las necesidades energéticas de los consumidores varían en función del contexto de cada momento o época. Asimismo, la transición energética hacia las energías limpias, así como el eficiente uso de cualquier tipo de energía son temas de actualidad que hacen que sea necesario conocer el comportamiento que tendrán las redes de distribución bajo diferentes condiciones de operación.

En este capítulo además de explicar como funciona el sistema de suministro eléctrico, se exponen los motivos por los que se estudiará el desequilibrio de las redes de distribución; se definen los objetivos del proyecto y presenta la estructura que seguirá este documento.

1.1 Sistema de suministro eléctrico

El sistema de suministro eléctrico presenta tres actividades bien diferenciadas. La primera actividad es la generación de energía eléctrica, que puede ser de dos tipos, centralizada o distribuida. El tipo de producción energética tradicional es la generación centralizada. En este tipo de sistema, hay empresas privadas que generan la electricidad en grandes cantidades en plantas de producción de potencia, con el fin de suministrarla a una zona geográfica. El sistema eléctrico actual presenta una generación centralizada y por tanto está diseñado para transportar electricidad procedente de pocos puntos de generación. Como alternativa a la generación centralizada se tiene la generación distribuida, en la que hay instalaciones de cogeneración, fotovoltaicas y en menor medida eólicas, tanto en industria como en grandes edificios. Este tipo de instalaciones están interconectadas a la red eléctrica dónde el usuario genera energía limpia para consumirla en su inmueble. En el caso de que en los propios nudos de los consumidores haya un excedente de producción, este se vierte a la red. La ventaja de este tipo de generación radica en que la energía se produce en los puntos de consumo, reduciendo las pérdidas en el transporte de la misma; dicho transporte es la segunda actividad del sistema de suministro eléctrico. Este transporte se realiza a través de dos etapas, en función de los niveles de tensión en los que se opere.

La red de transporte es la encargada de transportar la energía de alta tensión, 220 o 400 kV, a través de grandes distancias haciendo uso de subestaciones que reducen la tensión de forma gradual a medida que se acercan a los puntos de consumo. La Tabla 1-1, proporcionada por la Red Eléctrica de España (REE) [1], muestra los kilómetros que recorre la electricidad en la red de transporte nacional para cada valor de tensión en el año 2021. REE es la única empresa española encargada de gestionar la red de transporte en alta tensión. Las líneas de esta red presentan una estructura mallada que además de garantizar el flujo de potencia en cualquier sentido, garantiza a su vez la seguridad en el servicio eléctrico.

Tabla 1-1. Km de Circuito de la Red de Transporte Nacional en 2021

| Evolución de la Red de Transporte Nacional | |
|---|-----------|
| km de circuito a 400 kV | 21755.396 |
| km de circuito a 220 kV | 20039.177 |
| km de circuito hasta 132 kV | 2860.352 |
| Total [km] | 44654.925 |

La red de distribución, que transporta la energía de media, de 1 a 132 kV, o baja tensión., inferior a 1 kV, desde las subestaciones o centros de transformación a los clientes o usuarios finales. Esta red opera de forma radial para simplificar la operación técnica, pues facilita la localización de averías que detectan de los dispositivos de

protección, aunque a este tipo de estructura radial no es fiable en su totalidad, pues le falta garantía de servicio. Los responsables del mantenimiento y del servicio eléctrico de las líneas de distribución son las compañías distribuidoras. En la Tabla 2-1 puede apreciarse la longitud en km que tienen las redes de distribución en el territorio nacional.

Al compararlo con la tabla anterior puede verse como la longitud total de las líneas de las redes de distribución es mucho mayor que para las redes de transporte. A este hecho hay que sumarle que en aquellas el voltaje es inferior, por tanto, las pérdidas por km son mayores. Al mismo tiempo, los costes asociados al mantenimiento son mayores para las redes de distribución.

Tabla 1-2. Km de Línea de la Red de Distribución Nacional en 2018

| Línea | Km en Media Tensión | Km en Baja Tensión |
|-------------|---------------------|--------------------|
| Aérea | 80641 | 111685 |
| Subterránea | 22943 | 33325 |
| Total | 103584 | 145010 |

El consumo de la energía es la última actividad del sistema de suministro eléctrico, bien sea con fines residenciales, comerciales o industriales.

La Figura 1-1 muestra un diagrama esquematizado dónde pueden verse a gran escala las diferentes partes que componen el sistema de suministro eléctrico de un sistema de generación centralizada con redes de distribución aéreas. Tras la generación, es necesario aumentar los niveles de tensión con la ayuda de un centro de transformación para poder inyectar la energía a la red de transporte. Dicha energía recorrerá grandes distancias variando su nivel de tensión a su paso por las subestaciones reductoras hasta alcanzar los puntos de consumo con una tensión de 400 V.

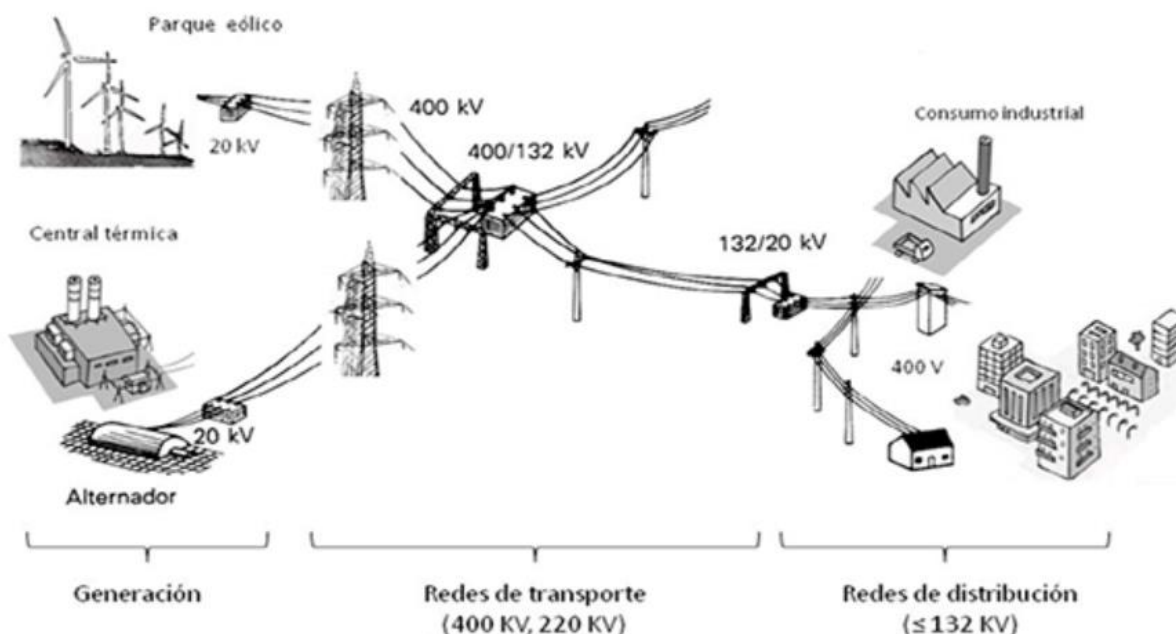


Figura 1-1. Diagrama esquematizado del Sistema de suministro eléctrico [2]

1.1.1 Evolución esperada del sistema energético

La sociedad actual se enfrenta a un gran reto a medio y largo plazo debido al aumento de temperatura global por

consecuencia del cambio climático y del agotamiento de los combustibles fósiles. Este reto no es otro que la descarbonización de la economía mediante la reducción de gases de efecto invernadero. Para conseguir este objetivo, la Unión Europea presentó a finales de 2019 una serie de estrategias mediante el Pacto Verde Europeo (Green Deal) [3], cuyos elementos clave son la electrificación de la economía, la máxima integración de energías renovables y la implantación de medidas de mejora en eficiencia energética.

En cuanto a la integración de energías renovables cabe resaltar que antes de que este pacto fuese firmado, ya había una ligera pero creciente tendencia en apostar por energías renovables tales como la eólica y la solar fotovoltaica. A su vez, también había una tendencia decreciente en cuanto al uso de energías no renovables procedentes de los combustibles fósiles. Esto puede apreciarse en la siguiente Figura 1-2, cuyos datos han sido obtenidos de REE [4], que muestra la evolución de la potencia instalada en el territorio peninsular en MW. Cabe esperar que esta tendencia continúe al alza y que conforme pasen los años las energías renovables aumenten tanto su potencia instalada, inyectando más energía a las redes de transporte, o como ya se ha comentado, produciéndola de forma distribuida como es el caso de producción de potencia fotovoltaica en redes de autoconsumo y menor medida, con energía eólica.

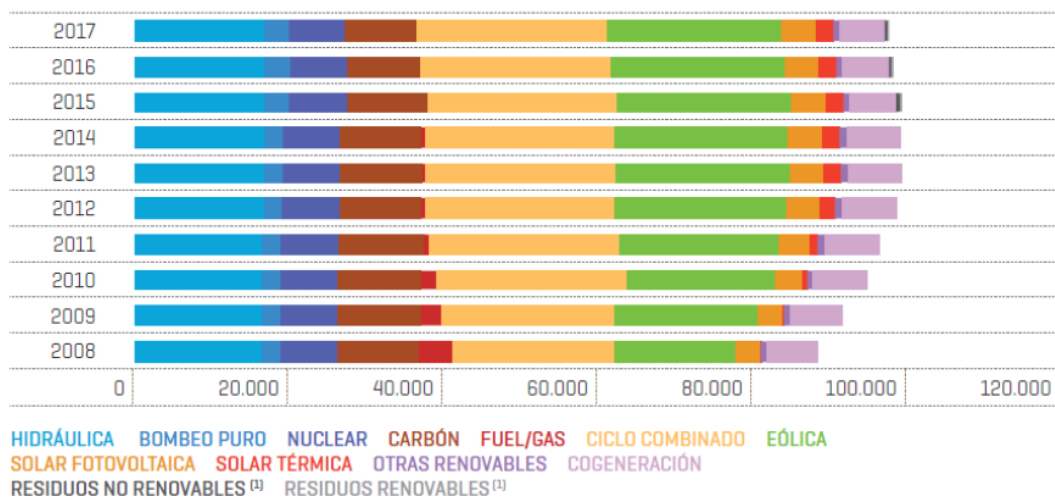


Figura 1-2. Evolución de la Estructura de Potencia Instalada Peninsular [MW]

Para la reducción de la huella de carbono, un papel fundamental en la electrificación de la economía es el de la apuesta por el vehículo eléctrico, siempre y cuando se cumpla lo dicho previamente y la generación de energía eléctrica tenga un origen renovable. Independientemente de ello, los motores eléctricos poseen una eficiencia media del 90 % mientras que la de los motores de combustión oscila entre el 25 y 30 %, sin contar con la contaminación acústica y en mayor medida del aire de las ciudades, no solo por el CO₂, sino también por otros gases tóxicos como los óxidos de nitrógeno (NO_x).

La implantación, masiva o total, del vehículo eléctrico es algo que tarde o temprano va a tener lugar y que incide directamente en un aumento de la demanda energética, la cuál también se verá afectada por el crecimiento exponencial de la población mundial y por el aumento de la renta per cápita de las economías en desarrollo.

El autoconsumo en viviendas es una alternativa que ayudaría a cubrir esta demanda. Este tipo de instalación cada vez es y será más frecuente, pero aún suponiendo que en un futuro existiese autoconsumo en todas las viviendas del país, se debe tener en cuenta que en España el máximo de demanda se tiene durante el invierno y a las horas finales del día, de modo que ni disminuiría la capacidad de generación ni el dimensionado de la red.

Es cierto que la red eléctrica española está sobredimensionada en términos de capacidad de producción, pues esta es alrededor del doble que los picos de consumos más altos, pero es posible que dentro de unos años se necesite de más potencia instalada para cubrir el aumento de la demanda, aunque este no es el único reto que debe superar el sistema de suministro eléctrico.

Todos los citados factores indican que el sistema de suministro eléctrico debe experimentar una transformación radical para garantizar la calidad del suministro y satisfacer las futuras necesidades energéticas.

1.1.2 Desequilibrios eléctricos

Con el fin de entender las condiciones de operación del sistema, se ha de tener en cuenta la dificultad de que, en la práctica, la potencia instalada en cada una de las fases de una red trifásica sea la misma; cuando las líneas de alta tensión se aproximan a las inmediaciones de los puntos de consumo, entran en una serie de centros de transformación disminuyendo el nivel de tensión hasta valores en baja tensión, de modo que en el último transformador reductor se distribuye el cable neutro junto a tres fases donde se reparte una fase y un neutro a cada conjunto de consumidores. Para entender esto, se da el ejemplo de redes de uso residencial, donde una fase alimenta a un número similar de viviendas, o mejor dicho, a una misma magnitud de carga que en las otras dos fases análogas. El propósito de ello es que el consumo de cada fase sea más o menos el mismo y así intentar tener un sistema lo más equilibrado posible.

Hay que tener en cuenta que la sociedad en su conjunto está constantemente conectando y desconectando dispositivos, no solo en los hogares, sino también en fábricas, empresas o comercios. Cada vez que suceden estas conexiones y desconexiones en elementos monofásicos, estamos produciendo desequilibrios. Nuestras redes eléctricas se enfrentan constantemente a la problemática de los sistemas eléctricos desequilibrados y asimétricos, aunque están diseñadas para tender hacia situaciones lo más equilibradas posibles.

Como se ha comentado con anterioridad, se da por hecho una progresiva y continua inserción del vehículo eléctrico en el sector transportes [5], en la Figura 1-3 puede verse la progresión estimada en el número de vehículos eléctricos de España para los próximos 10 años. Esto tendrá efectos muy importantes sobre la red de suministro eléctrico y en especial en las redes de distribución, dado que es necesario que haya puntos de carga repartidos en los hogares o en zonas habilitadas para tal fin.

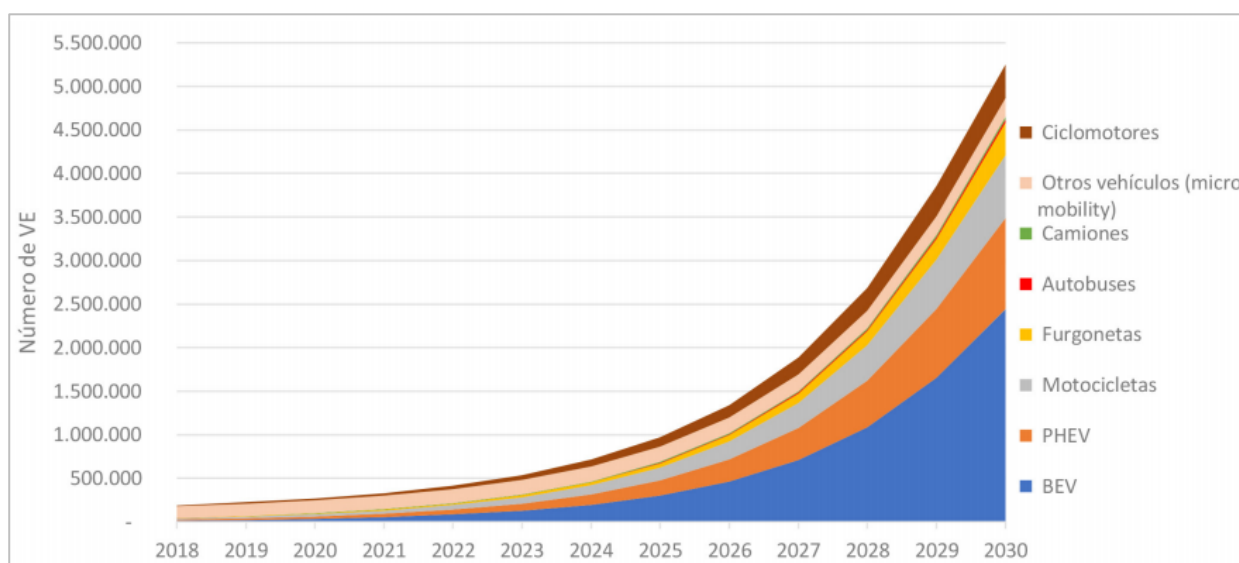


Figura 1-3. Evolución esperada del parque vehicular eléctrico en España [5]

En el momento en el que el vehículo eléctrico tenga una posición significativamente importante en el mercado, se intuye que aumentarán los niveles de desequilibrio en cuanto a la homogeneidad en el reparto del consumo de cargas entre fases. Cada usuario requerirá una cierta potencia en función de la capacidad de su vehículo y además, se debe garantizar el suministro en cualquier momento del día.

Otro factor a tener muy en cuenta es que el inevitable crecimiento en las instalaciones de autoconsumo [6], que con una legislación favorable será de 300 a 400 MW anuales, puede influir en la presencia de desequilibrios al ser normalmente estas instalaciones de carácter monofásico en su mayoría. El consiguiente aumento de tensión en dichos puntos de generación hará que estos puedan presentarse, aunque para que los desequilibrios sean consecuencia del autoconsumo han de darse ciertas condiciones donde la generación y el consumo no tengan un perfecto balance; dicho balance no ha de ser únicamente en la propia instalación, sino que también ha de haber un equilibrio de generación y consumo entre fases.

En lo referido a los desequilibrios eléctricos, se van a definir sus conceptos básicos, así como clasificarlos según sus características. Si representamos gráficamente en un diagrama fasorial las tensiones de un sistema equilibrado puede apreciarse que:

- El ángulo de los tres fasores, ya sea de tensión o de corriente, han de estar desfasados entre ellos a 120°
- La magnitud de los tres fasores es la misma

Estos son los dos factores principales que determinan que un sistema eléctrico está equilibrado. En caso de no cumplirse alguna de estas dos condiciones, puede decirse que el sistema está desequilibrado, cuanto mayor sean las desviaciones entre fasores, mayor será el desequilibrio eléctrico. En la Figura 1-4 puede verse una comparativa del diagrama fasorial de un sistema trifásico equilibrado y otro desequilibrado, además de como se modifican las formas de onda de corriente.

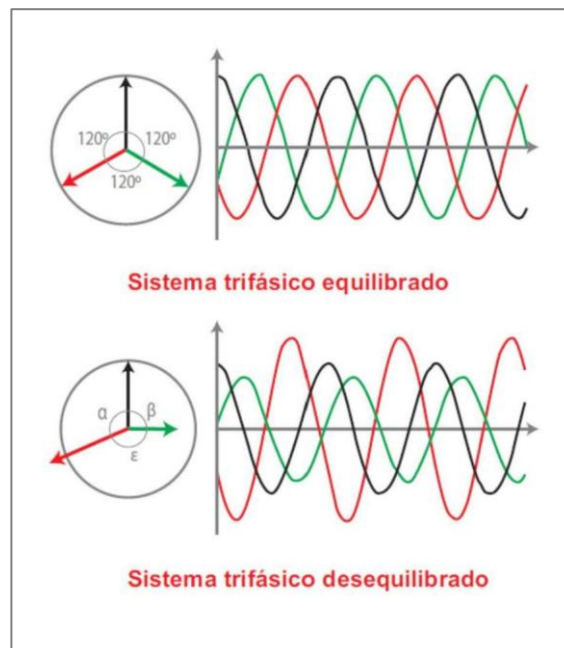


Figura 1-4. Comparación del Diagrama Fasorial de Sistema Equilibrado y Desequilibrado [6]

En un sistema equilibrado también pueden producirse desequilibrios temporales a causa de una perturbación como puede ser, por ejemplo, un cortocircuito en una o dos fases de un sistema trifásico. Esos cortocircuitos afectarán a dichas fases haciendo que temporalmente las magnitudes de tensión e intensidad difieran entre las fases afectadas y el resto. En función de la naturaleza que tenga un desequilibrio, pueden diferenciarse tres tipos de desequilibrios:

- Sistema simétrico desequilibrado, donde los ángulos de los fasores están desfasados 120° entre ellos, pero se tienen diferentes valores en el módulo de cada fasor debido a que hay diferentes valores de carga en las distintas fases y, por tanto, por cada una de las fases van a pasar corrientes diferentes
- Sistema asimétrico equilibrado, en el que el desfase entre cada una de las fases no será el mismo pero la magnitud de cada fasor sí será igual
- Sistema asimétrico desequilibrado, que se caracteriza en que entre fases no coinciden ni los desfases entre fasores ni el módulo de estos

En la Figura 1-5, pueden apreciarse los distintos diagramas fasoriales por el que se caracteriza cada tipo de desequilibrio.

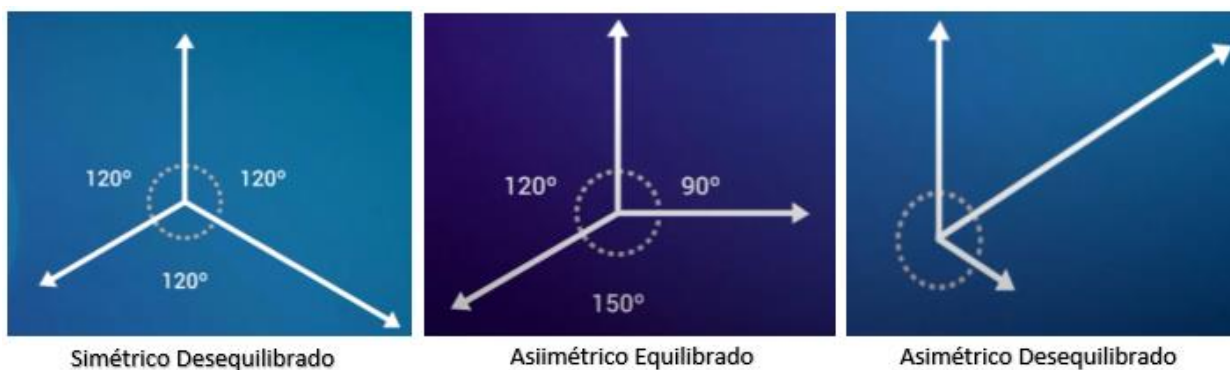


Figura 1-5. Diagramas Fasoriales de los distintos tipos de desequilibrio [7]

Un desequilibrio puede originarse por varios motivos: un problema en la alimentación (impedancias asimétricas en las bobinas de los transformadores), una ruptura de la resistencia de aislamiento de las bobinas del motor o la configuración del tipo de red de distribución, no obstante, la mayor parte de los desequilibrios son a causa de una distribución no homogénea de cargas monofásicas en el sistema trifásico. La conexión de consumidores o cargas monofásicas hace que las redes de distribución de baja tensión sean intrínsecamente desequilibradas, por lo que hay que hacer un esfuerzo para reducir este desequilibrio. En redes de baja tensión, es prácticamente imposible encontrarnos con un sistema perfectamente equilibrado, pero si el desequilibrio es muy pequeño este puede omitirse.

El estudio de este tipo de fenómenos que permitió comprender y resolver el desequilibrio o asimetría en los sistemas trifásicos surgió en 1918 de la mano de Charles Legeyt Fortescue [8], que planteó un sistema para sistematizar este tipo de cálculos llamado teorema de las componentes simétricas o Teorema de Fortescue. En dicho teorema se demuestra que cualquier tipo de sistema trifásico desequilibrado o asimétrico se va a poder descomponer siempre en tres sistemas equilibrados ficticios, cuyos procedimientos de cálculo son bien conocidos. Por lo tanto, a la hora de resolver un sistema trifásico cualquiera, da igual las distorsiones o desequilibrios que esta pueda tener, pues aplicando este teorema se obtienen tres problemas simples para poder dar con la solución de un problema complejo.

En la práctica, se ha de procurar que no se produzcan desequilibrios eléctricos, tal como indica la ITC-BT 19 REBT [9]. Es de vital importancia evitarlos porque todos los efectos que originan los desequilibrios tienen consecuencias negativas en la red además de los daños que originan.

- Altas corrientes del conductor neutro que al ser la principal vía de retorno transporta la mayor parte de la corriente desequilibrada, así como altas corrientes de puestas a tierra que dependerán de las resistencias que estas tengan, lo que puede suponer un problema de seguridad. Todo esto provoca un cambio del punto neutro
- Empleo de cables con secciones poco eficientes, estos además se deterioran por las altas temperaturas que pueden alcanzar y reducen su vida útil
- Uso ineficaz de la red
- Valores de tensión de fase-neutro y de fase-fase fuera de límites legales, acompañado de una dificultad para mantener la regulación de voltajes
- Necesidad de sobredimensionar las protecciones magnetotérmicas, con su consiguiente encarecimiento
- En las máquinas rotativas de inducción se genera un campo magnético opuesto al de diseño, reduciendo el par de fuerza, desgastando el sistema de rodamiento y sobrecalentando los motores.
- Aumento del coste económico al tener mayores pérdidas de potencia

El desequilibrio de corrientes está relacionado con el desequilibrio de tensión a través de las impedancias de la red, que pueden ser simétricas o asimétricas, como se muestra en la Figura 1-6.

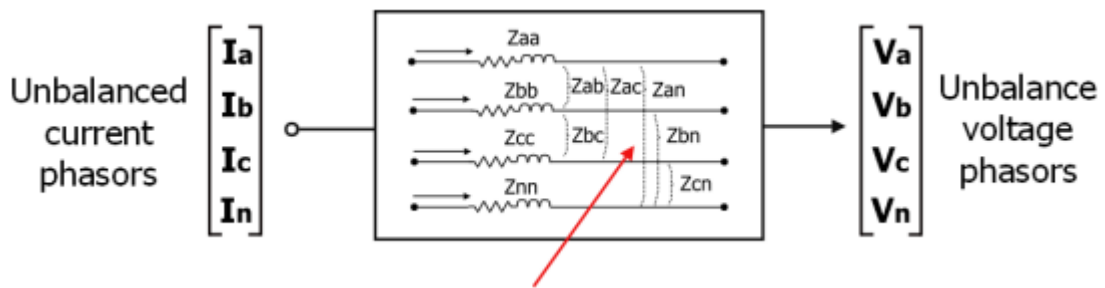


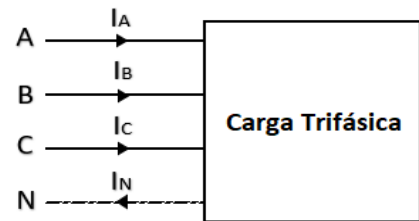
Figura 1-6. Relación entre tensiones y corrientes desbalanceadas [10]

Como se verá en el desarrollo de este proyecto, al aumentar los niveles de desequilibrio, las intensidades aumentan de un modo muy significativo. En un escenario de desequilibrio de consumo leve, un desequilibrio de tensiones promedio del 2% hace que las intensidades puedan alcanzar un desequilibrio del 17 %, por ello, el incremento de pérdidas de potencia puede explicarse fácilmente atendiendo a lo siguiente.

La potencia que absorbe un receptor trifásico es:

$$P_{Carga} = V_A I_A \cos \phi_A + V_B I_B \cos \phi_B + V_C I_C \cos \phi_C$$

$$Q_{Carga} = V_A I_A \sin \phi_A + V_B I_B \sin \phi_B + V_C I_C \sin \phi_C$$



Lo potencia que se pierde en las fases y el neutro:

$$P_{Linea} = R (I_A^2 + I_B^2 + I_C^2 + I_N^2)$$

$$Q_{Linea} = X (I_A^2 + I_B^2 + I_C^2 + I_N^2)$$

Cuando el sistema se encuentra desequilibrado, las intensidades I_A , I_B , I_C e I_N aumentan en mayor o menor medida en función del nivel de desequilibrio, lo que origina que la pérdida de potencias activa y reactiva también se incrementen de forma exponencial, tal como rigen las ecuaciones previamente mostradas.

Las pérdidas en los transformadores serán mayores que en condiciones de desequilibrio, suponiendo un coste adicional suministrar la misma cantidad de energía y reduciendo la vida útil de los transformadores debido a las tensiones térmicas adicionales.

1.2 Objetivos del proyecto

Respecto a lo citado con anterioridad en este apartado se justifica la necesidad del estudio de desequilibrios eléctricos para conocer el comportamiento que las redes actuales tienen ante este suceso. Por ello, el objetivo del presente proyecto es el de llevar a cabo un análisis eléctrico de los desequilibrios en redes de baja tensión, pues son estas redes las que se sufren los perjuicios causados por dichos desequilibrios. Si se atiende a la esperada evolución que tendrá lugar el sistema de suministro eléctrico, los desequilibrios pueden ser cada vez más frecuentes.

Para alcanzar dicho objetivo, se parte de una red de distribución de baja tensión que se presentará en el siguiente capítulo, de la que se modelan diferentes topologías de puesta a tierra y distintos grados de desequilibrio en el reparto de cargas. Tras una simulación de todos los casos de estudio propuestos, se obtienen KPI's o indicadores de rendimiento que permiten contrastar dichos casos.

1.3 Estructura del documento

Seguidamente, se resume brevemente el contenido de cada uno de los capítulos.

En el capítulo 2 se presenta la topología de las redes objeto de estudio proporcionadas por el Consejo Internacional de Grandes Redes Eléctricas. Del mismo modo, se detallan los componentes que tiene cada red y se muestran los parámetros de estos, necesarios para llevar a cabo el estudio.

En el capítulo 3 se describen las particularidades de los distintos escenarios de estudio, estos escenarios se generan en función del nivel desequilibrio de las cargas monofásicas y de distintas posiciones en las tomas de tierra del sistema.

En el capítulo 4 se explica el modo de trabajar con las dos herramientas informáticas que se han usado. Estas herramientas son OpenDSS y MatLab.

En el capítulo 5 se definen indicadores con el fin de comparar los diferentes casos de estudio y se presentan los resultados obtenidos.

En el capítulo 6 se sintetizan las conclusiones obtenidas a raíz de los resultados.

2 RED DE ESTUDIO Y ESCENARIOS DE CONSUMO

En este capítulo se describe detalladamente la red objeto de estudio, dónde se hará un análisis topológico de la misma y se presentarán sus componentes, así como los parámetros principales de estos. Dicha red objeto de estudio se basa en una red de distribución europea de baja tensión (BT), proporcionada por el Consejo Internacional de Grandes Redes Eléctricas (CIGRE), el cual en 2014 la publicó en un estudio sobre la integración de recursos energéticos renovables y distribuidos [11]. CIGRE [12] es una comunidad global de colaboración comprometida con el programa de desarrollo de conocimientos líder en el mundo para la creación y el intercambio de experiencia en sistemas de energía.

En la Figura 2-1 puede apreciarse la citada red. Como podemos observar, esta se compone de tres subredes o feeders: el Residencial, situado a la izquierda de la figura; el Industrial, que se encuentra en el centro y que además no será sometido a análisis en este proyecto; y el Comercial, que se encuentra a la derecha.

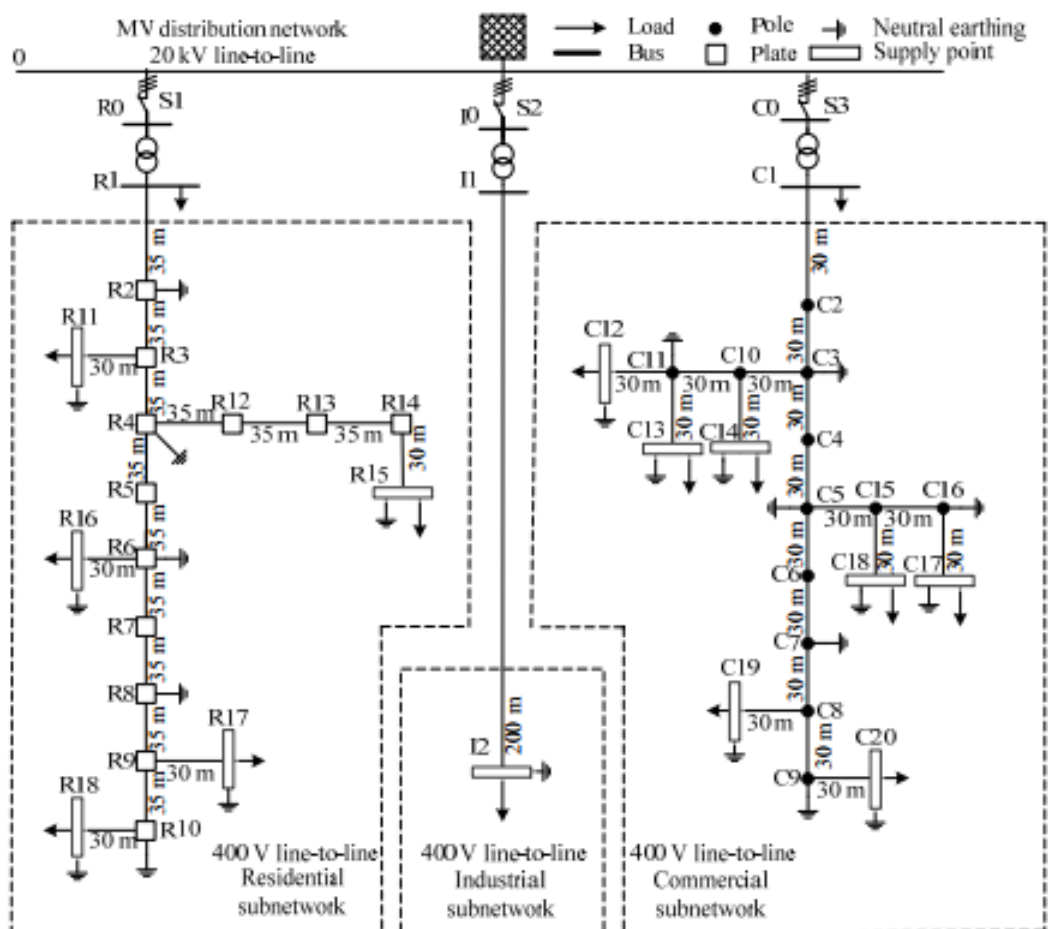


Figura 2-1. Topología de la Red de Distribución de BT de referencia europea definida en [9]

2.1. Topología de la Red

La red objeto de estudio de este proyecto puede apreciarse en la Figura 2-2, dicha red se compone de dos feeders, el feeder comercial, situado a la izquierda y el feeder residencial que se encuentra a la derecha. El feeder Comercial será analizado de un modo exhaustivo a lo largo del desarrollo de este proyecto, haciendo que el feeder Residencial pase a estar en un segundo plano. Tanto los nudos como las cargas de la red siguen una nomenclatura numérica acompañada del prefijo “C” en el feeder Comercial o “R” en el Residencial. Primero se comienza nombrando a los nudos para después nombrar las cargas.

Ambos feeders poseen una tensión de línea de 400 V, en BT y están alimentadas por una red de distribución en media tensión (MT) de 20 kV. Cada feeder tiene un transformador propio que le sirve de nexo con la red de distribución, dichos transformadores tienen una potencia de 300 kVA en el feeder Comercial y 500 kVA en el Residencial. Al tratarse de un sistema eléctrico en BT, todos los trayectos mostrados aguas debajo de los transformadores se realizan a través de cuatro hilos: tres fases denominadas A, B y C, más el elemento neutro, N. Además, presentan una estructura radial, siendo la frecuencia del sistema 50 Hz.

En el feeder Comercial, la distancia entre los nudos es siempre la misma e igual a 30 m. En el feeder Residencial, la distancia entre nudos puede variar entre 30 y 35 m.

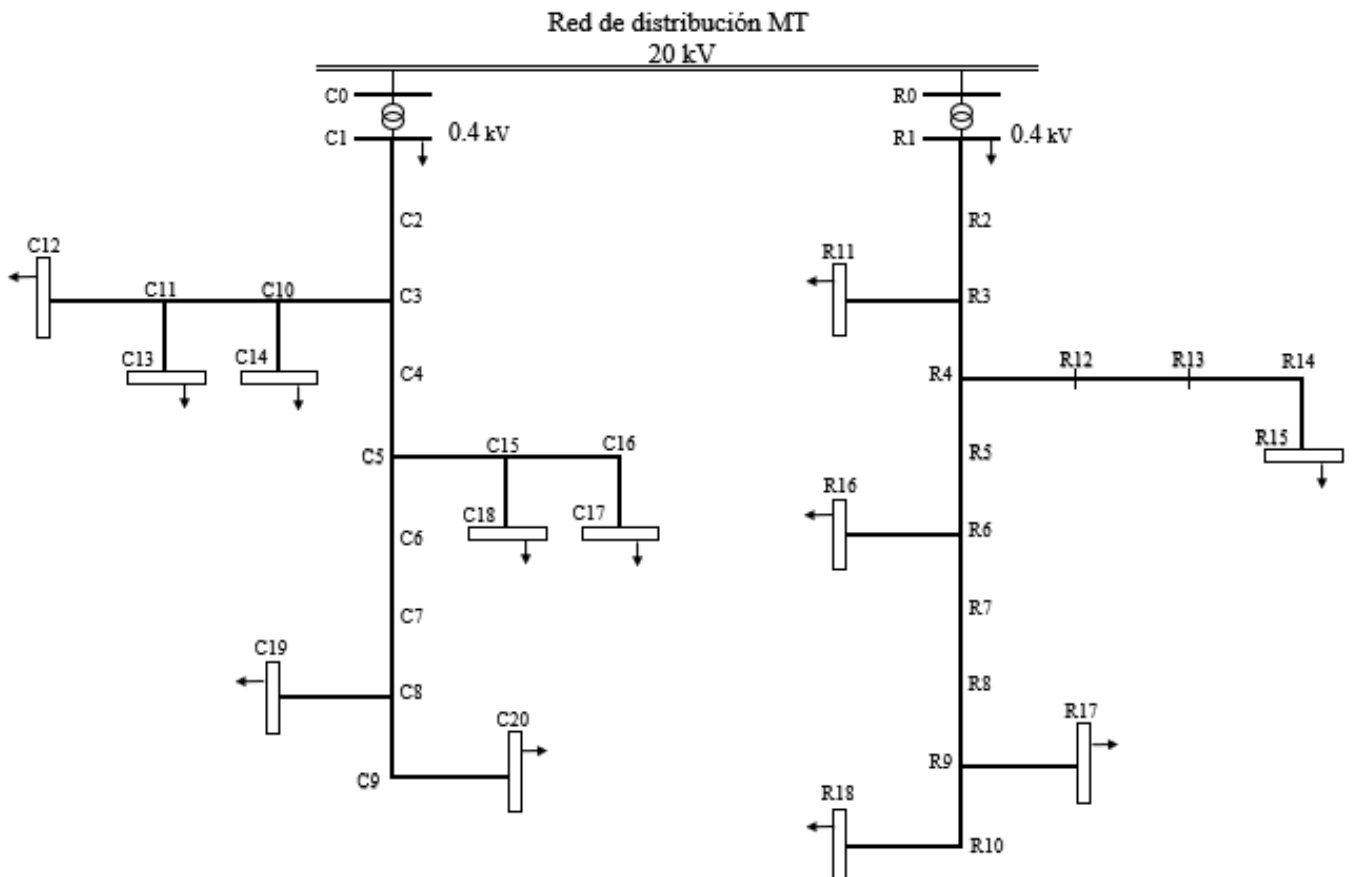


Figura 2-2. Esquema de la Red de BT Objeto de Estudio

La posición de las tomas a tierra, así como el valor de la resistencia de las mismas, será una variable en este proyecto, originando de este modo las diferentes topologías de puesta a tierra que serán descritas en el siguiente capítulo.

Las cargas o consumidores del sistema, son a priori trifásicas, aunque las estudiaremos como cargas monofásicas. A pesar de que estas cargas estén perfectamente equilibradas en todas sus fases, esto hace que las redes de distribución de baja tensión sean intrínsecamente desequilibradas, por lo que hay que hacer un esfuerzo

para reducir este desequilibrio. El valor de la potencia de las mismas, así como su factor de potencia, se pueden ver en la siguiente Tabla 2-1.

Tabla 2-1 Potencia de las Cargas de la Red

| Comercial | | | Residencial | | |
|-----------|-------------------------|--------------------|-------------|-------------------------|--------------------|
| Carga | Potencia Aparente [kVA] | Factor de potencia | Carga | Potencia Aparente [kVA] | Factor de Potencia |
| C1 | 120 | 0.9 | R1 | 200 | 0.95 |
| C12 | 20 | 0.9 | R11 | 15 | 0.95 |
| C13 | 20 | 0.9 | R15 | 52 | 0.95 |
| C14 | 25 | 0.9 | R16 | 55 | 0.95 |
| C17 | 25 | 0.9 | R17 | 35 | 0.95 |
| C18 | 8 | 0.9 | R18 | 47 | 0.95 |
| C19 | 16 | 0.9 | - | - | - |
| C20 | 8 | 0.9 | - | - | - |
| Total | 242 kVA | | | 404 kVA | |

La potencia total instalada en el feeder Comercial es de 242 kVA y su transformador tiene una potencia de 300 kVA, asimismo, en el caso Residencial la potencia instalada es de 404 kVA, siendo su transformador de 500 kVA. Estas cargas no siempre trabajan a su máxima potencia, se adecuan a las necesidades de demanda del sistema, las cuales varían según el tramo horario del día. De este modo, se genera un perfil de carga diario en cada feeder. Dichos perfiles pueden verse en la Figura 2-3.

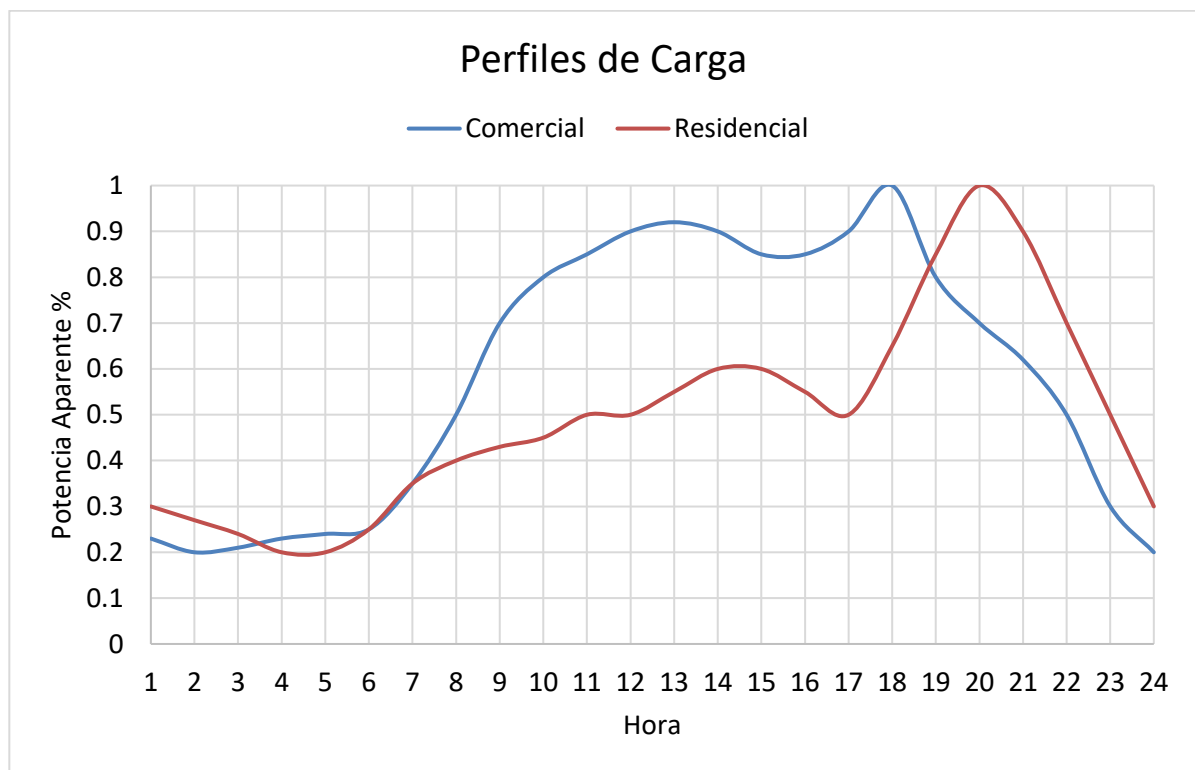


Figura 2-3. Perfiles de Carga de la Red

Por motivos de cálculo, es necesario definir cuáles van a ser las líneas y dónde van a estar ubicadas, esta definición se ve reflejada en la Tabla 2-2.

Tabla 2-2. Definición de las líneas de la red

| Comercial | | | Residencial | | |
|---------------|---------------|-------|---------------|---------------|-------|
| Desde el nudo | Hasta el nudo | Línea | Desde el nudo | Hasta el nudo | Línea |
| C1 | C2 | 1 | R1 | R2 | 20 |
| C2 | C3 | 2 | R2 | R3 | 21 |
| C3 | C4 | 3 | R3 | R4 | 22 |
| C4 | C5 | 4 | R4 | R5 | 23 |
| C5 | C6 | 5 | R5 | R6 | 24 |
| C6 | C7 | 6 | R6 | R7 | 25 |
| C7 | C8 | 7 | R7 | R8 | 26 |
| C8 | C9 | 8 | R8 | R9 | 27 |
| C3 | C10 | 9 | R9 | R10 | 28 |
| C10 | C11 | 10 | R3 | R11 | 29 |
| C11 | C12 | 11 | R4 | R12 | 30 |
| C11 | C13 | 12 | R12 | R13 | 31 |
| C10 | C14 | 13 | R13 | R14 | 32 |
| C5 | C15 | 14 | R14 | R15 | 33 |
| C15 | C16 | 15 | R6 | R16 | 34 |
| C15 | C18 | 16 | R9 | R17 | 35 |
| C16 | C17 | 17 | R10 | R18 | 36 |
| C8 | C19 | 18 | - | - | - |
| C9 | C20 | 19 | - | - | - |

2.2 Parámetros de la Red

Una vez es conocida la topología de la red, se pasa a presentar los parámetros que se han tenido en cuenta a la hora de modelar a la misma. Estos parámetros sirven para definir los tipos de conductores y transformadores que están presentes en el sistema.

2.2.1. Conductores de la Red

En el feeder comercial, las conexiones se realizan a través de líneas aéreas, utilizándose para ello tres tipos de conductores, denominados: OH1, OH2, OH3, del inglés “overhead”. Los conductores son de aluminio.

En el residencial, las conexiones se realizan a través de líneas subterráneas y se utilizan dos tipos de conductores, llamados: UG1 y UG3, del inglés “underground”. Los conductores son de tipo NA2XY.

Lo que diferencia a los conductores es su calibre, tal como podemos ver en la Tabla 2-3.

Tabla 2-3 Sección de los conductores de la Red

| Comercial | | Residencial | |
|---------------|----------------------------|---------------|----------------------------|
| Tipo de cable | Sección [mm ²] | Tipo de cable | Sección [mm ²] |
| OH1 | 70 | UG1 | 240 |
| OH2 | 25 | UG3 | 50 |
| OH3 | 16 | - | - |

Los conductores OH1 y UG1 componen las acometidas principales de cada feeder, derivando la potencia a los nudos con consumo. En la Figura 2-4 se puede ver de un modo gráfico cuál es la arquitectura de la red en cuanto a tipos de conductores.

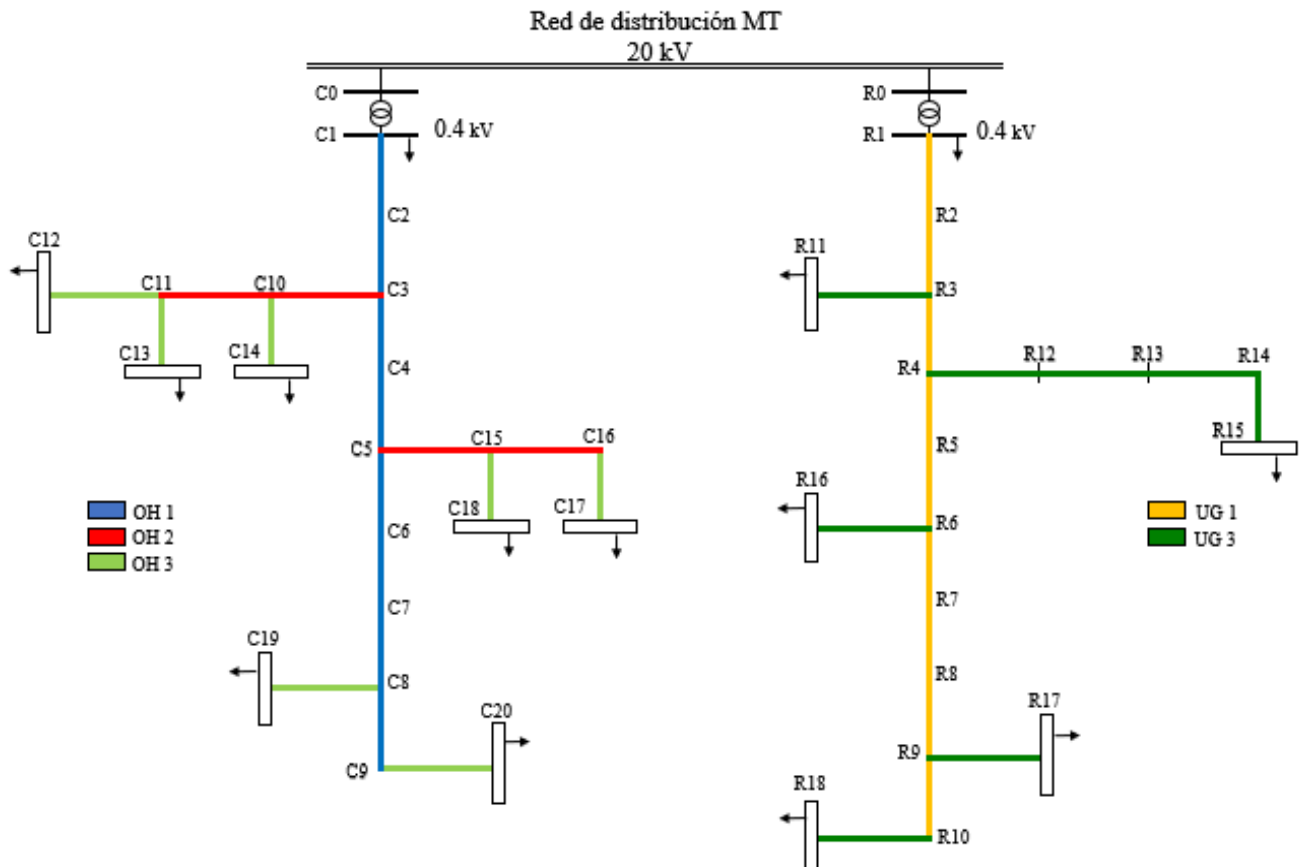


Figura 2-4. Esquema unifilar de los distintos conductores de la Red

Cada tipo de conductor posee una matriz de impedancia de fase, dada en Ω/km y denominada Z . La matriz de impedancia de fase se utiliza para determinar con precisión las caídas de tensión en los segmentos de la línea de alimentación una vez que se han determinado las corrientes. Dado que no se han hecho aproximaciones respecto a la separación entre conductores, se tiene en cuenta con precisión el efecto del acoplamiento mutuo y propio entre fases.

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

Esta matriz es simétrica, por lo que:

$$Z_{ab} = Z_{ba}, Z_{ac} = Z_{ca}, Z_{an} = Z_{na}, Z_{bc} = Z_{cb}, Z_{bn} = Z_{nb}, Z_{cn} = Z_{nc}$$

Además, tiene la peculiaridad de que los elementos de la diagonal principal son iguales numéricamente:

$$Z_{aa} = Z_{bb} = Z_{cc}$$

En la Tabla 2-4 pueden verse las matrices de impedancia de fase de cada tipo de conductor.

Tabla 2-4. Matrices de impedancia de fase de los conductores

| Conductor | Matriz de impedancia de fase [Ω/km] | | | | |
|-----------|---|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| | Fase | A | B | C | N |
| OH1 | A | 0.54 + j 0.777 | 0.049 + j 0.505 | 0.049 + j 0.462 | 0.049 + j 0.436 |
| | B | 0.049 + j 0.505 | 0.54 + j 0.777 | 0.049 + j 0.505 | 0.049 + j 0.462 |
| | C | 0.049 + j 0.462 | 0.049 + j 0.505 | 0.54 + j 0.777 | 0.049 + j 0.505 |
| | N | 0.049 + j 0.436 | 0.049 + j 0.462 | 0.049 + j 0.505 | 0.54 + j 0.777 |
| OH2 | A | 1.369 + j 0.812 | 0.049 + j 0.505 | 0.049 + j 0.462 | 0.049 + j 0.436 |
| | B | 0.049 + j 0.505 | 1.369 + j 0.812 | 0.049 + j 0.505 | 0.049 + j 0.462 |
| | C | 0.049 + j 0.462 | 0.049 + j 0.505 | 1.369 + j 0.812 | 0.049 + j 0.505 |
| | N | 0.049 + j 0.436 | 0.049 + j 0.462 | 0.049 + j 0.505 | 1.369 + j 0.812 |
| OH3 | A | 2.065 + j 0.825 | 0.049 + j 0.505 | 0.049 + j 0.462 | 0.049 + j 0.436 |
| | B | 0.049 + j 0.505 | 2.065 + j 0.825 | 0.049 + j 0.505 | 0.049 + j 0.462 |
| | C | 0.049 + j 0.462 | 0.049 + j 0.505 | 2.065 + j 0.825 | 0.049 + j 0.505 |
| | N | 0.049 + j 0.436 | 0.049 + j 0.462 | 0.049 + j 0.505 | 2.065 + j 0.825 |
| UG1 | A | 0.54 + j 0.777 | 0.049 + j 0.505 | 0.049 + j 0.462 | 0.049 + j 0.436 |
| | B | 0.049 + j 0.505 | 0.54 + j 0.777 | 0.049 + j 0.505 | 0.049 + j 0.462 |
| | C | 0.049 + j 0.462 | 0.049 + j 0.505 | 0.54 + j 0.777 | 0.049 + j 0.505 |
| | N | 0.049 + j 0.436 | 0.049 + j 0.462 | 0.049 + j 0.505 | 0.54 + j 0.777 |
| UG3 | A | 1.369 + j 0.812 | 0.049 + j 0.505 | 0.049 + j 0.462 | 0.049 + j 0.436 |
| | B | 0.049 + j 0.505 | 1.369 + j 0.812 | 0.049 + j 0.505 | 0.049 + j 0.462 |
| | C | 0.049 + j 0.462 | 0.049 + j 0.505 | 1.369 + j 0.812 | 0.049 + j 0.505 |
| | N | 0.049 + j 0.436 | 0.049 + j 0.462 | 0.049 + j 0.505 | 1.369 + j 0.812 |

2.2.2. Datos de los Transformadores

Los parámetros de los transformadores de la red se muestran en la Tabla 2-5, dónde la impedancia de los mismos está referida al circuito secundario.

Tabla 2-5. Parámetros del transformador de la Red

| Feeder | Desde el nudo | Hasta el nudo | Conexión | V ₁ [kV] | V ₂ [kV] | Z _T [Ω] | S [kVA] |
|-------------|---------------|---------------|----------|------------------------|------------------------|-----------------------|------------|
| Comercial | C0 | C1 | Dyn | 20 | 0.4 | 0.0053 + j 0.0213 | 300 |
| Residencial | R0 | R1 | Dyn | 20 | 0.4 | 0.0032 + j 0.0128 | 500 |

3 ESCENARIOS DE ESTUDIO

En el presente capítulo, se exponen todos los casos que tendremos en cuenta a la hora de estudiar la red descrita en el anterior capítulo, de modo que la topología de esta variará en cada uno de ellos, bien sea modificando la posición de las tomas de puesta a tierra o modelando un consumo de cargas monofásicas desequilibrado en mayor o menor medida.

Como se ha comentado, en primer lugar, se van a generar distintos escenarios de conexión a tierra y de mallado de ambos feeders, dónde la posición de las tomas de puesta tierra será variable, al igual que los valores de la resistencia a tierra que estas puedan tener. Es así como surgen las diferentes configuraciones de puesta a tierra que a continuación serán descritas. En todos los escenarios de estudio está presente el elemento neutro, siendo este elemento al que se conectan todas las cargas y las tomas de tierra. A su vez, el lado de baja del transformador siempre tendrá una toma de tierra.

En segundo lugar, se describen las características de los diferentes tipos de desequilibrio que serán objeto de estudio. Para crear dicho desequilibrio, se definen distintos escenarios dónde el consumo de las cargas monofásicas que componen la red no estará repartido de forma equitativa entre las tres fases del sistema.

Combinando los escenarios de conexión a tierra con los distintos tipos de desequilibrio, obtenemos cada uno de los casos, cuyos resultados analizaremos en el quinto capítulo este proyecto.

3.1 Configuraciones de Puesta a Tierra para el feeder Comercial

En este apartado, se describen las diferentes configuraciones de puesta a tierra a las que va a estar sometido el feeder Comercial. Este es el más importante de los dos, la mayoría de los casos de estudio son exclusivos de este feeder, mientras que el Residencial no será estudiado únicamente por sí solo.

Como primera alternativa, se propone un escenario donde ningún nudo tiene conexión a tierra, a excepción del nudo correspondiente al secundario del transformador, este elemento siempre tendrá una toma de tierra; después, se tiene un escenario en el que los nudos terminales son los que tienen puestas a tierra (PT), dichos nudos corresponden con nudos de consumo; en el tercer escenario la PT está presente en los nudos donde se bifurca alguna línea y en el cuarto y último escenario que se tiene en el feeder Comercial, todos los nudos aguas abajo del transformador presentan PT.

3.1.1 Casos 1 y 2. Escenario con transformador como único elemento con conexión a tierra

Al ser el transformador el único elemento con toma de tierra, se trata de un sistema TN-C. Se tienen dos casos de estudio dentro de este escenario, el caso 1 y el caso 2, ambos siguen este esquema, la diferencia entre ellos está en el valor de la resistencia de la puesta a tierra del transformador, denominada R_T , como puede apreciarse en la Tabla 3-1.

Tabla 3-1. Valor de la resistencia de tierra de los casos 1 y 2

| Caso | R_T [Ω] |
|------|--------------------|
| 1 | 3 |
| 2 | 1000 |

A continuación, se muestra en la Figura 3-1 un esquema de conexión tipo TN-C, dónde puede verse la posición de la resistencia de tierra del transformador.

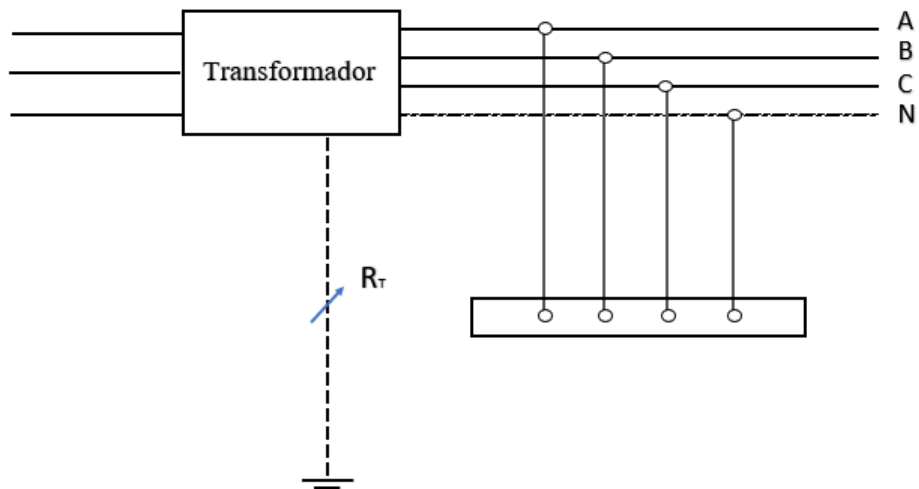


Figura 3-1. Esquema de Puesta a Tierra de los Casos 1 y 2

3.1.2 Casos 3 y 4. Escenario donde los nodos terminales tienen conexión a tierra

Los siguientes casos de estudio, 3 y 4, siguen un sistema de conexión TT donde las cargas, las cuales se encuentran en los nodos terminales, tienen una toma de tierra a través del neutro, tal y como puede verse en la Figura 3-2.

La diferencia entre estos casos radica en el valor que toma la resistencia de PT de las cargas, denominada R_G , dado que la resistencia de PT del transformador no varía en este escenario. La siguiente tabla muestra los valores de las diferentes resistencias a tierra de los casos 3 y 4.

Tabla 3-2. Valor de las resistencias de tierra de los casos 3 y 4

| Caso | R_T [Ω] | R_G [Ω] |
|------|--------------------|--------------------|
| 3 | 3 | 3 |
| 4 | 3 | 20 |

Este escenario a priori es más interesante que el escenario anterior, ya que la presencia de PT en las cargas es una medida de vital importancia que está presente en casi toda instalación eléctrica, brindando seguridad ante posibles fugas de corriente que pueden causar daños tanto a los propios consumidores como a las personas.

Se espera que la presencia de PT en las cargas tenga un efecto positivo en el sistema, disminuyendo en cierta medida las intensidades y tensiones del elemento neutro, pues parte de la intensidad que circula por este puede ser evacuada a tierra.

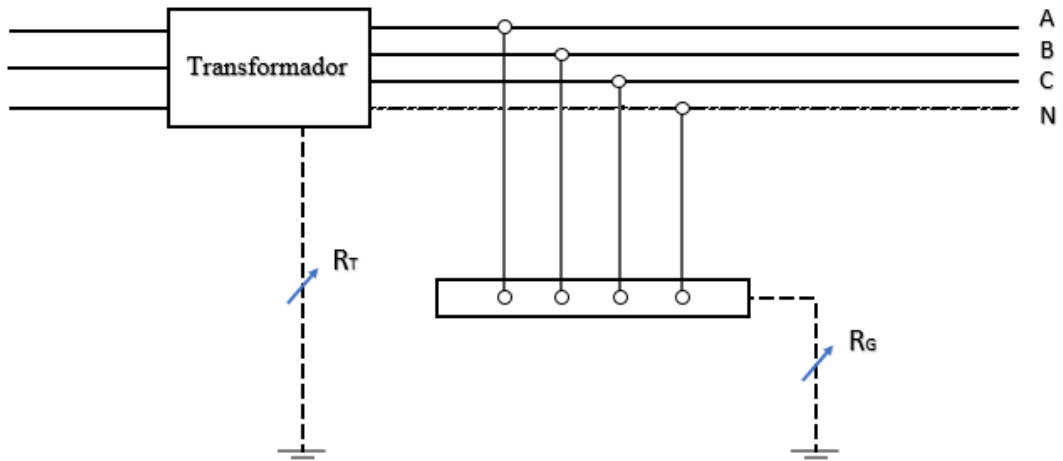


Figura 3-2. Esquema de Puesta a Tierra de los Casos 3 y 4

Se puede ver una representación de la posición de las tomas de tierra, que aparecen como flechas rojas, en la Figura 3-3.

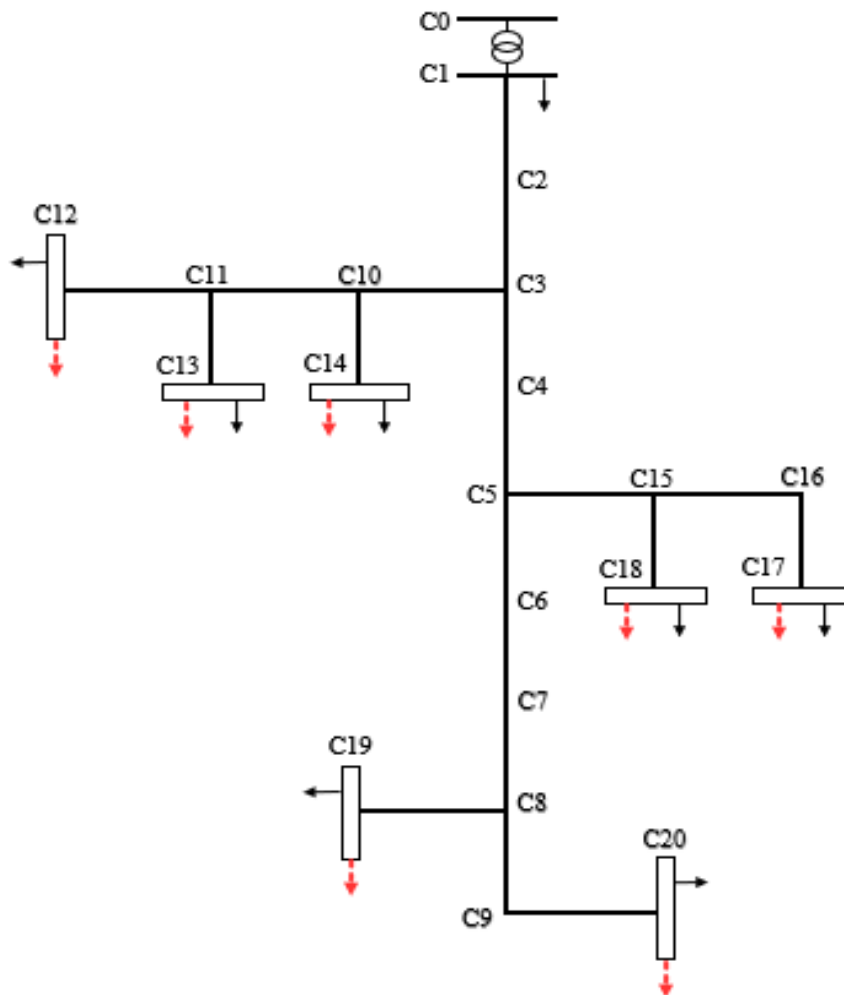


Figura 3-3. Esquema Unifilar del feeder Comercial para los Casos 3 y 4

3.1.3 Casos 5 y 6. Escenario donde los nudos bifurcación tienen conexión a tierra

En los casos de estudio 5 y 6, las conexiones a tierra se encuentran tanto en el transformador como en los nudos bifurcación. Ninguno de estos nudos posee consumidores de modo que en este escenario las cargas se encuentran sin PT.

En la Tabla 3-3 se muestra el valor que toman las resistencias de PT de los nudos bifurcación, llamadas R_N , en estos dos diferentes casos.

Tabla 3-3. Valor de las resistencias de tierra de los casos 5 y 6

| Caso | R_T [Ω] | R_N [Ω] |
|------|--------------------|--------------------|
| 5 | 3 | 3 |
| 6 | 3 | 20 |

Se puede intuir que los efectos que tiene sobre la red este escenario serán muy similares a los del escenario anterior.

Como puede observarse en la siguiente Figura 3-5, solo los nudos donde las ramas del sistema se bifurcan poseen puesta a tierra, que aparecen en rojo al igual que en el escenario anterior.

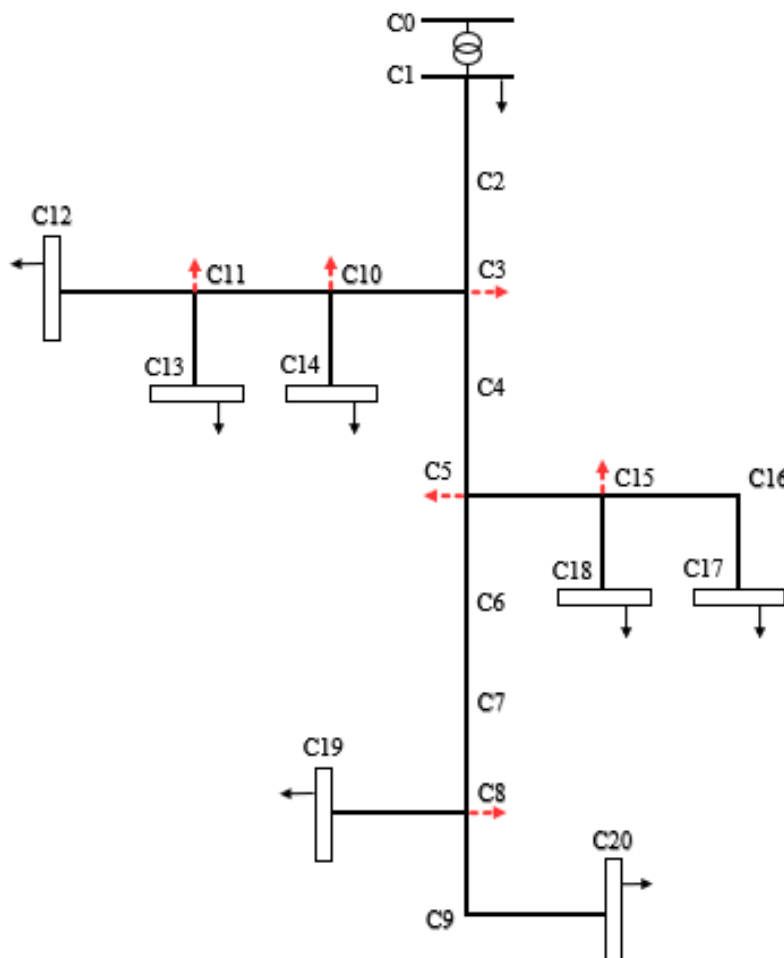


Figura 3-4. Esquema Unifilar del feeder Comercial para los Casos 5 y 6

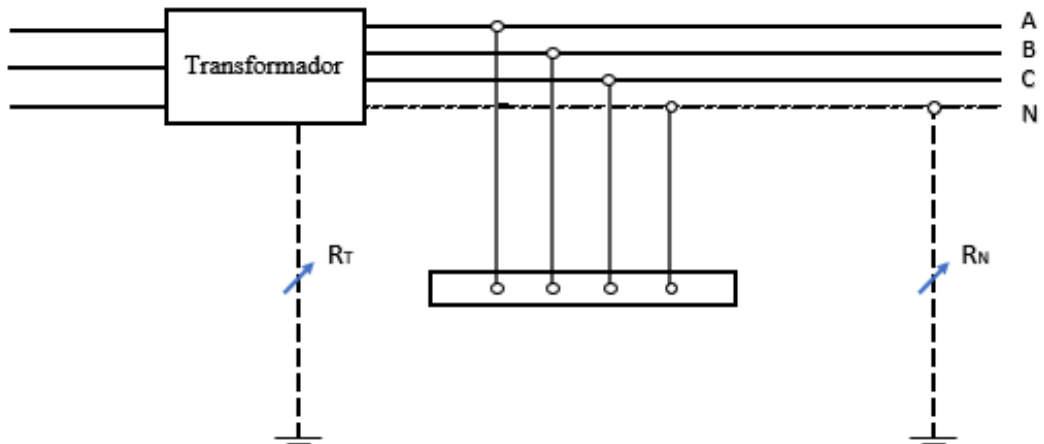


Figura 3-5. Esquema de Puesta a tierra de los Casos 5 y 6

3.1.4 Casos 7 y 8. Escenario de estudio con todos los nudos puestos a tierra

Los casos de estudio 7 y 8 presentan toma de tierra en cada uno de sus nudos. Se muestra a continuación una tabla con el valor de las resistencias de puesta a tierra que tienen todos los nudos, tanto en el caso 7 como en el caso 8.

Tabla 3-4. Valor de las resistencias de tierra de los casos 7 y 8

| Caso | R_T [Ω] | R_G [Ω] | R_N [Ω] |
|------|--------------------|--------------------|--------------------|
| 7 | 3 | 3 | 3 |
| 8 | 3 | 20 | 20 |

Asimismo, puede verse una representación gráfica de la posición de estas tomas de tierra.

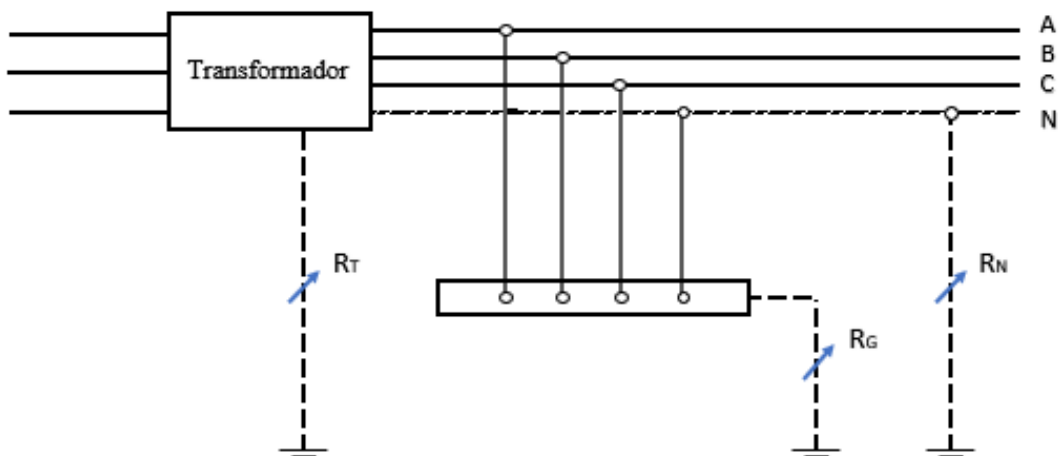


Figura 3-6. Esquema de Puesta a Tierra de los Casos 7 y 8

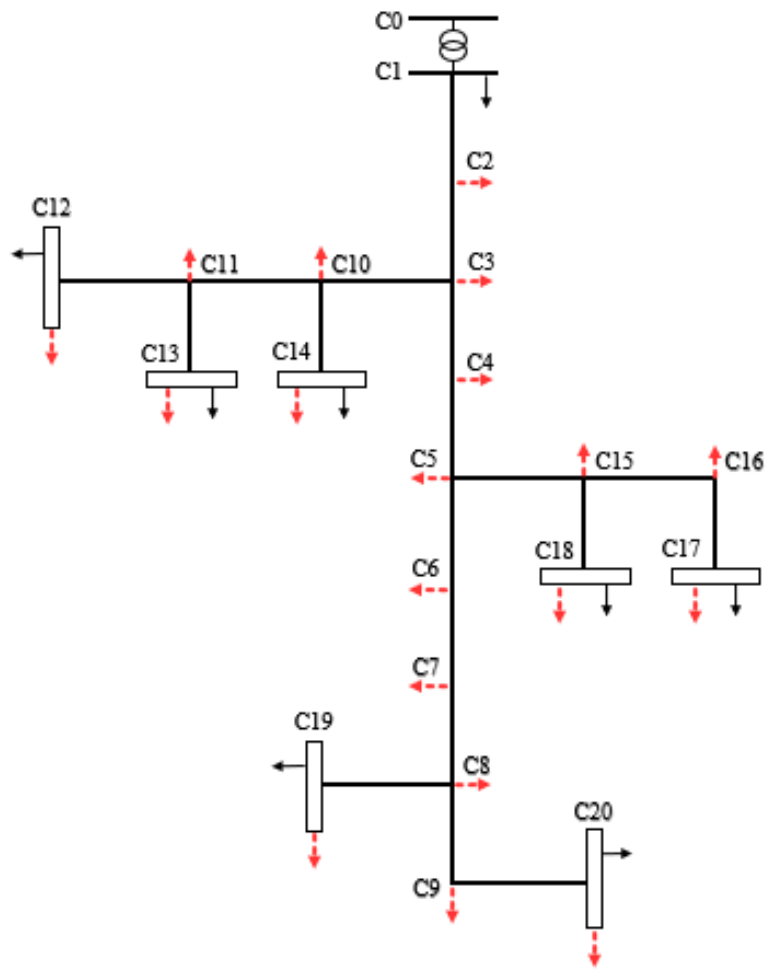


Figura 3-7. Esquema Unifilar del feeder Comercial para los Casos 7 y 8

3.2 Configuración de mallado de la Red Comercial con la Red Residencial

En esta sección, se presenta la configuración de puesta a tierra de la red compuesta por los feeders Comercial y Residencial. Además, se añade la peculiaridad de que mallaremos las dos redes por sus respectivos nudos terminales a través del elemento neutro, permitiendo de este modo el intercambio de potencia entre ambos feeders, como queda reflejado en la Figura 3-8. El objetivo de esta configuración es el de observar el comportamiento del feeder Comercial bajo estas condiciones.

Puede intuirse que es en esta configuración dónde el sistema va a tener un mejor comportamiento frente a los desequilibrios de tensión e intensidad por el hecho de tratarse de una red mallada.

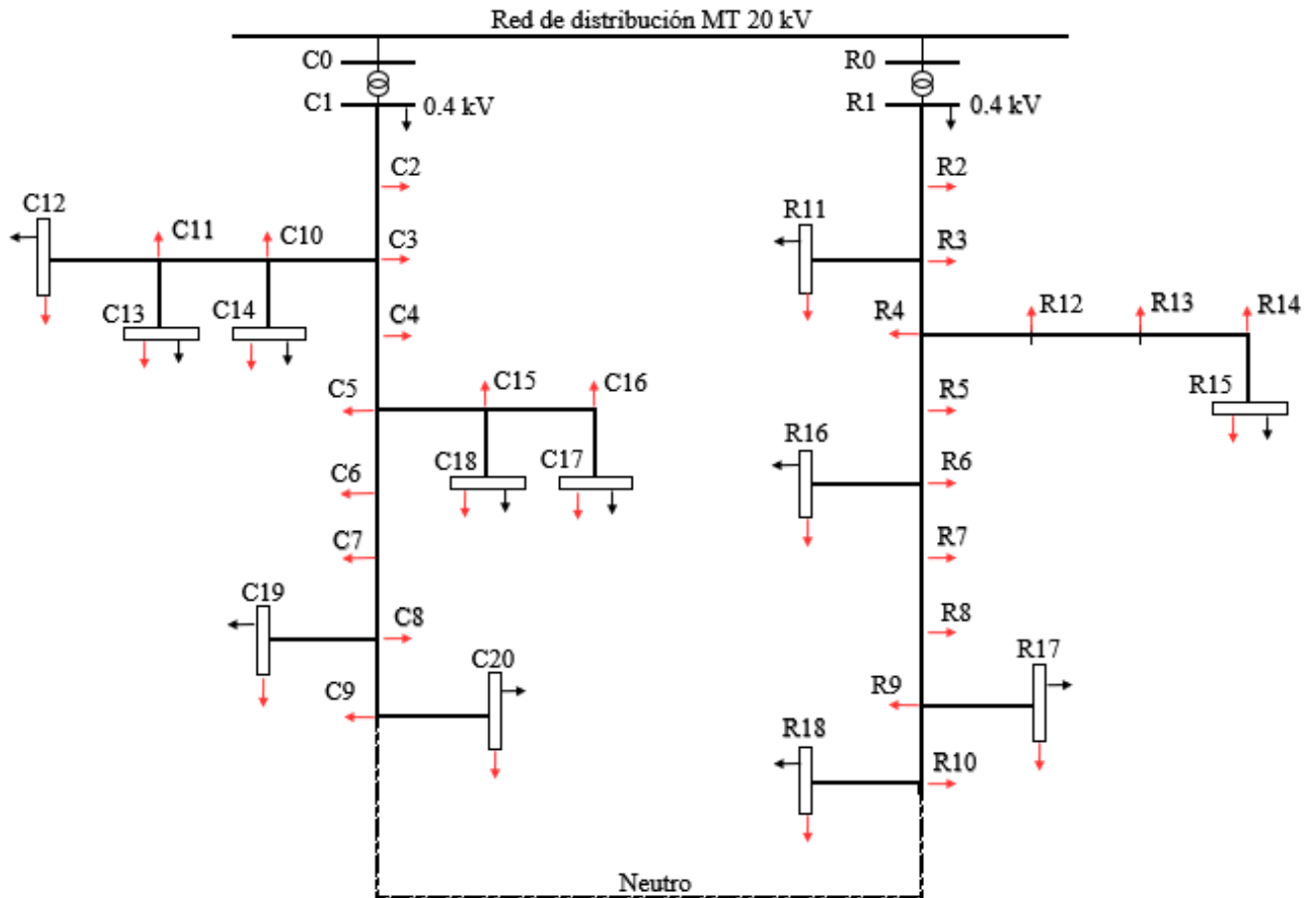


Figura 3-8. Esquema Unifilar de la Red para los Casos 9 y 10

Es así como se generan los casos de estudio 9 y 10, dónde todos los nudos tienen una puesta a tierra, cuyo valor varía según cada caso de estudio tal como refleja la Tabla 3-5. En el caso 9 las PT son cables ideales, mientras que en el caso 10 la resistencia de estos es mucho más elevada que en el resto de casos.

Tabla 3-5. Valor de las resistencias de tierra de los casos 9 y 10

| Caso | R_T [Ω] | R_G [Ω] | R_N [Ω] |
|------|--------------------|--------------------|--------------------|
| 9 | 3 | 0 | 0 |
| 10 | 3 | 1000 | 1000 |

Recopilación de los valores de puesta a tierra en cada uno de los casos

A continuación, se muestra una tabla resumen de los distintos valores que toman las resistencias de PT en cada uno de los casos de estudio. Hay que destacar que los casos 1 y 2 no tienen ninguna resistencia en los nudos y cargas (R_G) y por ello el valor de la esta es infinito. El caso 2 también resalta por el alto valor de resistencia a tierra del transformador, mismo valor que en el caso 10 tienen todas las resistencias a tierra de los nudos y las cargas.

Tabla 3-6. Resumen del valor de las resistencias de tierra de los casos de estudio

| Caso | R_T [Ω] | R_G [Ω] | R_N [Ω] |
|------|--------------------|--------------------|--------------------|
| 1 | 3 | ∞ | ∞ |
| 2 | 1000 | ∞ | ∞ |
| 3 | 3 | 3 | 3 |
| 4 | 3 | 20 | 20 |
| 5 | 3 | 3 | 3 |
| 6 | 3 | 20 | 20 |
| 7 | 3 | 3 | 3 |
| 8 | 3 | 20 | 20 |
| 9 | 3 | 0 | 0 |
| 10 | 3 | 1000 | 1000 |

3.3 Tipos de desequilibrio

En este apartado, se presenta como se han diseñado los diferentes escenarios de desequilibrio en el consumo de las cargas monofásicas que forman parte de la Red. Para modelar el desequilibrio, se ha modificado el valor de la potencia de las cargas monofásicas que constituyen a una carga trifásica. Cada carga monofásica se encuentra en una fase de la red: A, B y C.

En una red equilibrada, las tres cargas monofásicas tienen el mismo valor entre sí, de modo que la potencia de una carga monofásica es igual a la tercera parte de la potencia de una carga trifásica:

$$\frac{S_{\text{Trifásica}}}{3} = S_{\text{Monofásica}}$$

Incumpliendo esta igualdad, se modelan tres distintos tipos de desequilibrio, clasificados en función del nivel en que este desequilibrio se manifiesta. De esta forma, se tiene un escenario levemente desequilibrado, moderadamente desequilibrado y fuertemente desequilibrado, dichos escenarios se describen a continuación.

3.3.1. Escenario de consumo perfectamente equilibrado

En el escenario con consumo perfectamente equilibrado, la potencia total del circuito se reparte de manera equitativa entre las tres fases, de tal forma que se cumple la condición de equilibrio antes mostrada, aunque es posible que haya pequeños desequilibrios de corrientes y de caídas de tensión, debido a las impedancias propias y mutuas entre fases y a la misma configuración del tipo de red.

En la subred comercial, la potencia total instalada es de 242 kVA, por lo que en cada fase hay una potencia

instalada de 80.67 kVA. Por otro lado, la subred residencial tiene una potencia total de 404 kVA, tanto la fase A, B y C tienen una potencia instalada de 134.67 kVA. Dicho de otro modo, cada fase tiene un 33.33% de la potencia total.

En la Tabla 3-7 puede verse el valor de las cargas monofásicas de la red cuando el consumo de estas es totalmente equilibrado.

Tabla 3-7. Potencias monofásicas del escenario perfectamente equilibrado

| Cargas Monofásicas | | | |
|---------------------------|-------|-------------------------|--------------------|
| Feeder | Carga | Potencia Aparente [kVA] | Factor de Potencia |
| Comercial | C1 | 40 | 0.9 |
| | C12 | 6.67 | 0.9 |
| | C13 | 6.67 | 0.9 |
| | C14 | 8.33 | 0.9 |
| | C17 | 8.33 | 0.9 |
| | C18 | 2.67 | 0.9 |
| | C19 | 5.33 | 0.9 |
| | C20 | 2.67 | 0.9 |
| Residencial | R1 | 66.67 | 0.95 |
| | R11 | 5 | 0.95 |
| | R15 | 17.33 | 0.95 |
| | R16 | 18.33 | 0.95 |
| | R17 | 11.67 | 0.95 |
| | R18 | 15.67 | 0.95 |

3.3.2. Escenario de consumo levemente desequilibrado

En el escenario levemente desequilibrado la potencia total del circuito no se reparte de forma equitativa entre las tres fases. Hay que destacar que este tipo de desequilibrio solo aplica al feeder Comercial. Se ha modelado de tal forma que la fase A tiene un 37.02 % de la potencia instalada, la fase B un 30.14% y la fase C un 32.83%; como puede apreciarse, hay un pequeño desequilibrio en el consumo de las cargas.

Levemente Desequilibrado

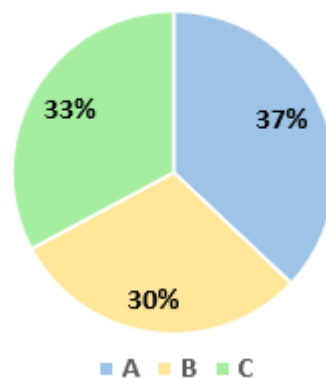


Figura 3-9. Porcentaje de potencia instalada de cada fase del escenario levemente desequilibrado

Este desequilibrio se ha conseguido multiplicado el valor la potencia de la carga monofásica equilibrada de cada fase por un determinado índice o factor. La tabla 3-8 muestra el dato exacto que tiene este factor en cada una de las fases del sistema.

Tabla 3-8. Valor de la potencia monofásica en cada fase del escenario levemente desequilibrado

| Carga | Fase A | | Fase B | | Fase C | |
|-------|---------------------|-------------------------|---------------------|-------------------------|---------------------|-------------------------|
| | Factor Aplicado [%] | Potencia Aparente [kVA] | Factor Aplicado [%] | Potencia Aparente [kVA] | Factor Aplicado [%] | Potencia Aparente [kVA] |
| C1 | 125 | 50 | 75 | 30 | 100 | 40 |
| C12 | 80 | 5.33 | 140 | 9.33 | 80 | 5.33 |
| C13 | 50 | 3.33 | 100 | 6.67 | 150 | 10 |
| C14 | 130 | 10.83 | 85 | 7.08 | 85 | 7.08 |
| C17 | 110 | 9.17 | 120 | 10 | 70 | 5.83 |
| C18 | 70 | 1.87 | 70 | 1.87 | 160 | 4.27 |
| C19 | 115 | 6.13 | 85 | 4.53 | 100 | 5.33 |
| C20 | 110 | 2.93 | 130 | 3.47 | 60 | 1.6 |

Como ya se ha comentado, la fase A es la fase que posee en total, más consumo que ninguna otra fase, pero como puede verse en la Tabla 3-8, esto no implica que a todas las cargas de esta fase se le haya aplicado un factor mayor que a las demás, de hecho, en cada carga se ha ido alternando la fase con mayor consumo.

Para ver de un modo visual como se han diseñado las cargas del sistema levemente desequilibrado, se muestra la Figura 3-10, donde todas las cargas monofásicas de este sistema se presentan en un gráfico de barras.

Cada carga trifásica está representada por un color y cada barra representa el valor de la potencia aparente de la carga monofásica, estando estas ordenadas de izquierda a derecha según se trate de la fase A, B o C.

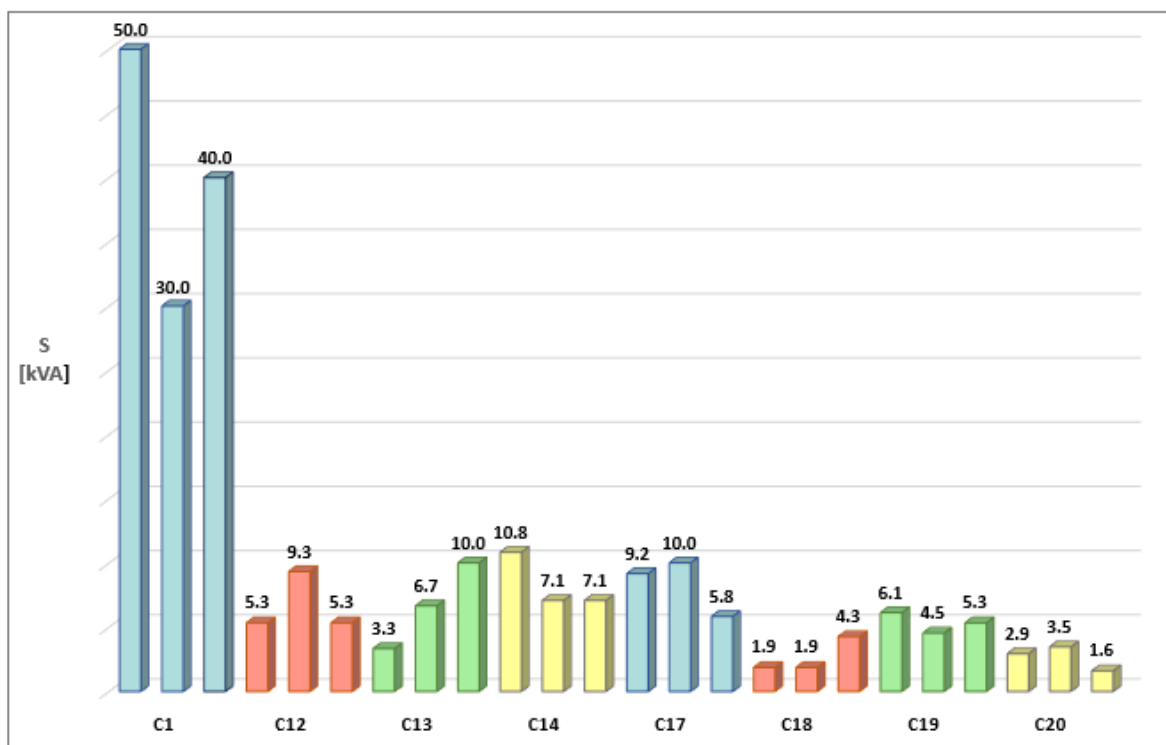


Figura 3-10. Potencias monofásicas de cada fase en el escenario levemente desequilibrado

En la Figura 3-11 se muestra la evolución diaria del consumo de potencia total que demanda cada fase del feeder Comercial del escenario levemente desequilibrado.

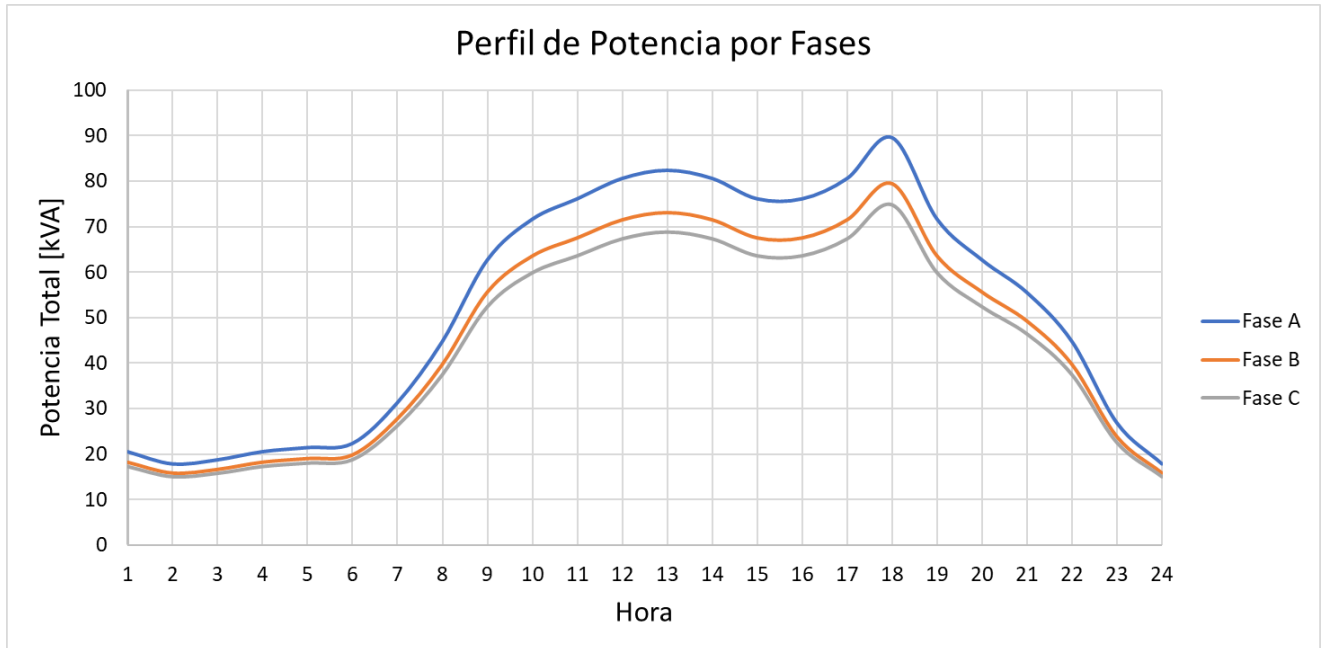


Figura 3-11. Perfil de Potencia del escenario levemente desequilibrado

3.3.3. Escenario moderadamente desequilibrado

En el escenario moderadamente desequilibrado, el desequilibrio se acentúa más que en el escenario perfectamente desequilibrado, pues la fase A tiene un 42.74% de la potencia total instalada, la fase B un 26.33% y la C un 30.93%. Si comparamos estos porcentajes con los del escenario levemente desequilibrado, se ve realmente que el desequilibrio se hace cada vez más notorio.

Moderadamente Desequilibrado

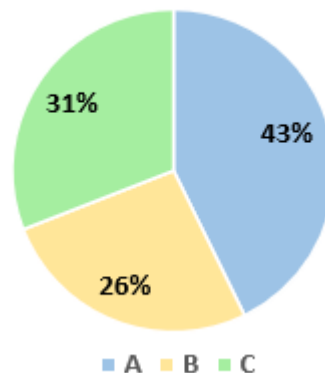


Figura 3-12. Porcentaje de potencia instalada de cada fase del escenario moderadamente desequilibrado

El escenario moderadamente desequilibrado no se simulará en el feeder Residencial. Del mismo que en el escenario anterior, este tipo de desequilibrio se ha creado multiplicando por un factor a las cargas monofásicas de cada fase, dicho diseño se muestra en la siguiente tabla.

Tabla 3-9. Valor de la potencia monofásica en cada fase del escenario moderadamente desequilibrado

| Carga | Fase A | | Fase B | | Fase C | |
|-------|---------------------|-------------------------|---------------------|-------------------------|---------------------|-------------------------|
| | Factor Aplicado [%] | Potencia Aparente [kVA] | Factor Aplicado [%] | Potencia Aparente [kVA] | Factor Aplicado [%] | Potencia Aparente [kVA] |
| C1 | 150 | 60 | 50 | 20 | 100 | 40 |
| C12 | 60 | 4 | 180 | 12 | 60 | 4 |
| C13 | 0 | 0 | 100 | 6.67 | 200 | 13.33 |
| C14 | 200 | 16.67 | 50 | 4.17 | 50 | 4.17 |
| C17 | 110 | 9.17 | 145 | 12.08 | 45 | 3.75 |
| C18 | 50 | 1.33 | 50 | 1.33 | 200 | 5.33 |
| C19 | 170 | 9.07 | 55 | 2.93 | 75 | 4 |
| C20 | 120 | 3.2 | 170 | 4.53 | 10 | 0.27 |

De nuevo, en cada carga se ha ido alternando la fase con mayor consumo. Se destaca que se ha suprimido la carga monofásica del nudo C13 situada en la fase A para que el desequilibrio sea aún más notable. En la Figura 3-13, se muestra un gráfico con los datos de la tabla anterior para visualizar este tipo de desequilibrio.

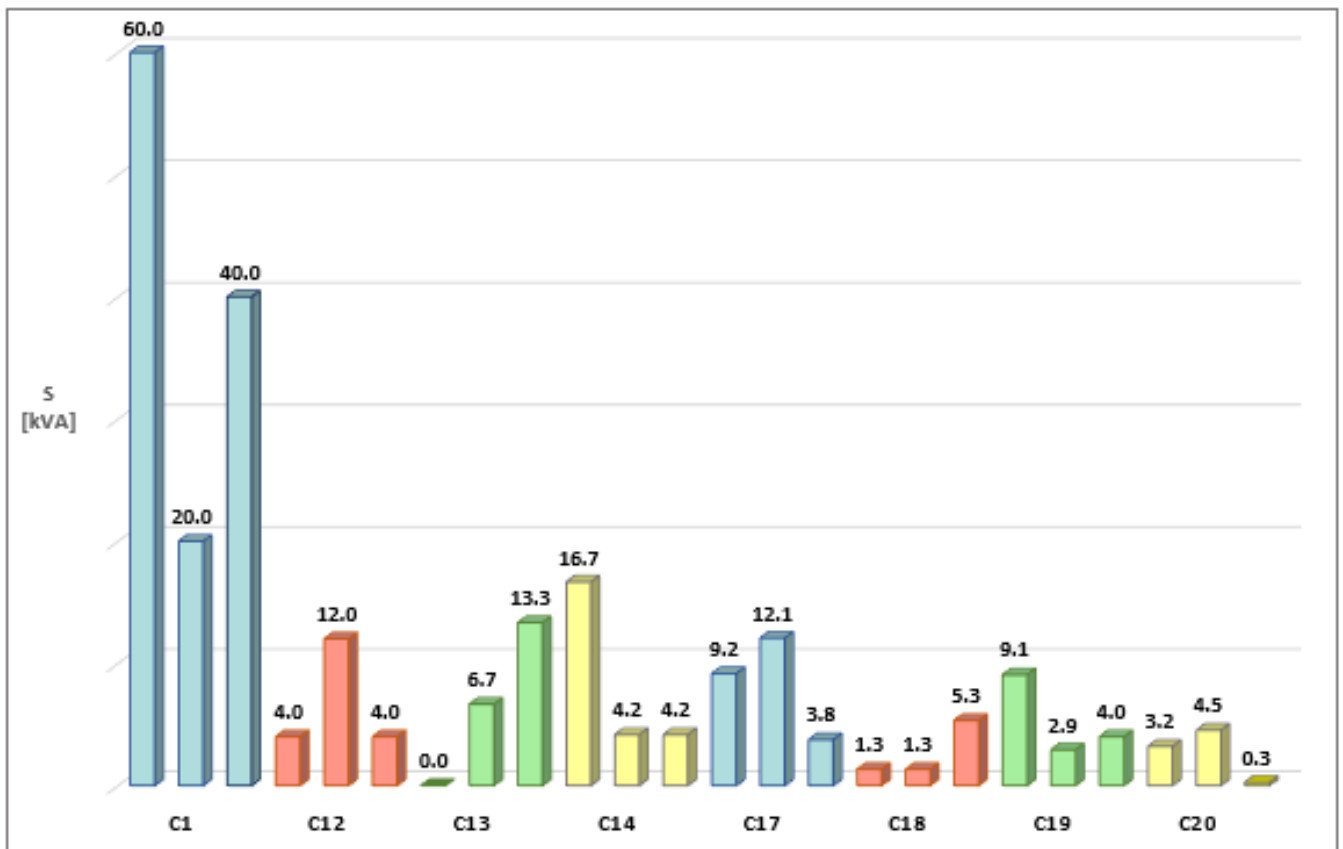


Figura 3-13. Potencias monofásicas de cada fase en el escenario levemente desequilibrado

Al igual que en el escenario anterior, se presenta la evolución diaria del consumo de potencia total que demanda cada fase del feeder Comercial, para del escenario moderadamente desequilibrado.

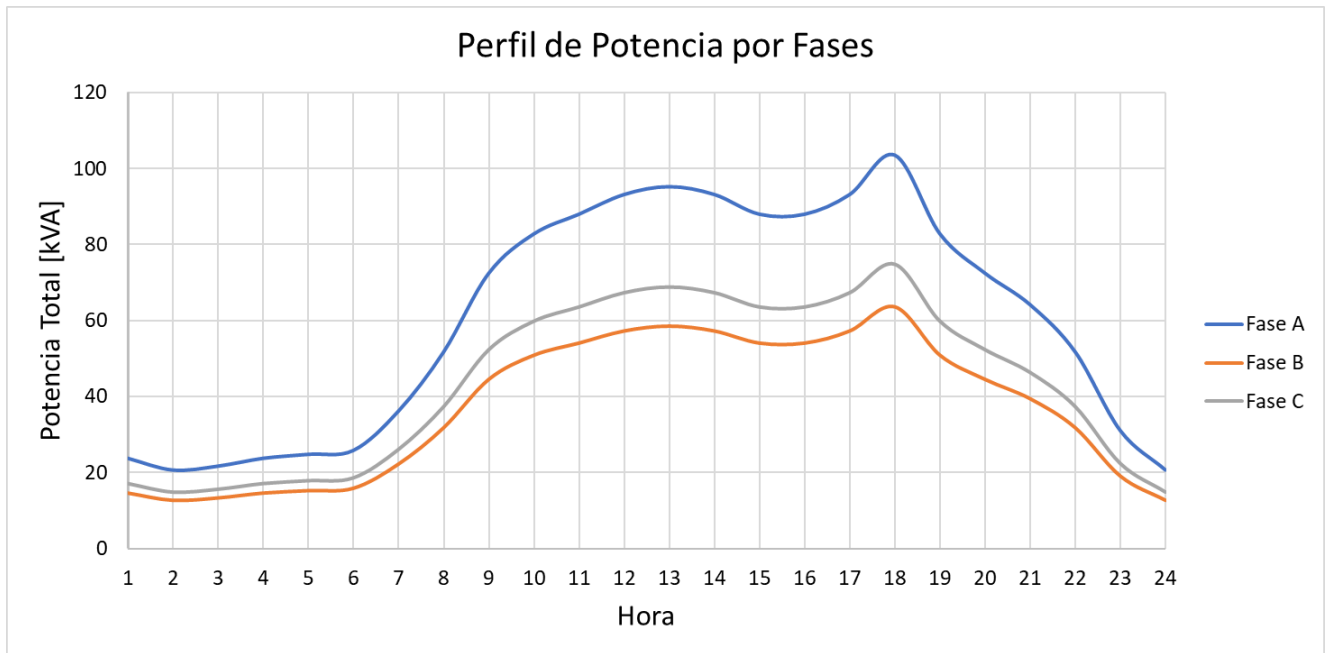


Figura 3-14. Perfil de Potencia del escenario moderadamente desequilibrado

3.3.4. Escenario fuertemente desequilibrado

El escenario fuertemente desequilibrado se estudiará en ambos feeders de la red. Se ha modelado de tal forma que la mayor parte del consumo de la red se ha desplazado hacia la fase C, de modo que esta fase tiene un 54,98% de la potencia total instalada, mientras que las fases A y B tienen respectivamente un 15,31 y un 29,70%, como muestra el gráfico circular de la Figura 3-15. Hay una diferencia muy significativa respecto a los escenarios anteriores.

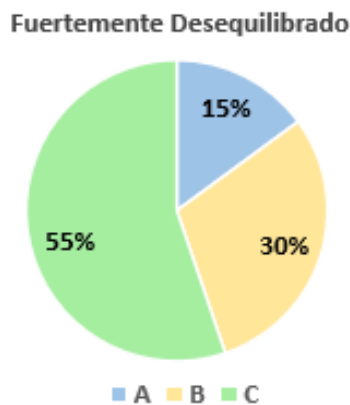


Figura 3-15. Porcentaje de potencia instalada de cada fase del escenario moderadamente desequilibrado

El desequilibrio de consumo de las cargas monofásicas se origina designando un factor que multiplicará a cada una de ellas, al igual que los dos desequilibrios anteriores. En la siguiente tabla se muestra qué factor ha sido aplicado a cada carga.

Tabla 3-10. Valor de la potencia monofásica en cada fase del escenario fuertemente desequilibrado

| Carga | Fase A | | Fase B | | Fase C | |
|-------|---------------------|-------------------------|---------------------|-------------------------|---------------------|-------------------------|
| | Factor Aplicado [%] | Potencia Aparente [kVA] | Factor Aplicado [%] | Potencia Aparente [kVA] | Factor Aplicado [%] | Potencia Aparente [kVA] |
| C11 | 50 | 20 | 100 | 40 | 150 | 60 |
| C12 | 60 | 4 | 60 | 4 | 180 | 12 |
| C13 | 50 | 3.33 | 50 | 3.33 | 200 | 13.33 |
| C14 | 55 | 4.58 | 75 | 6.25 | 170 | 14.17 |
| C17 | 45 | 3.75 | 110 | 9.17 | 145 | 12.08 |
| C18 | 0 | 0 | 100 | 2.67 | 200 | 5.33 |
| C19 | 50 | 2.67 | 50 | 2.67 | 200 | 10.67 |
| C20 | 10 | 0.27 | 120 | 3.20 | 170 | 4.53 |
| R1 | 50 | 33.33 | 100 | 66.67 | 150 | 100 |
| R11 | 60 | 3 | 60 | 3 | 180 | 9 |
| R15 | 50 | 8.67 | 50 | 8.67 | 200 | 34.67 |
| R16 | 55 | 10.08 | 75 | 13.75 | 170 | 31.17 |
| R17 | 45 | 5.25 | 110 | 12.83 | 145 | 16.92 |
| R18 | 0 | 0 | 100 | 15.67 | 200 | 31.33 |

Si se observa la Tabla 3-10, puede verse una peculiaridad con respecto a los dos escenarios anteriores y es que a todas las cargas de la fase C se le ha asignado un factor mayor que a sus análogas de las fases A y B. Para incrementar el nivel de desequilibrio, se elimina el consumo de las cargas de la fase A situadas en los nudos C18 y R18. Son estas características las que determinan que este tipo de escenario es el más desequilibrado de los tres escenarios que se han descrito.

Se muestran a continuación dos gráficos de columnas, uno para el feeder Comercial, Figura 3-16, y otro para el Residencial, Figura 3-14, dónde se pueden comparar visualmente los valores de potencia aparente instalada que tienen en cada fase las cargas monofásicas de ambos feeders objeto de estudio.

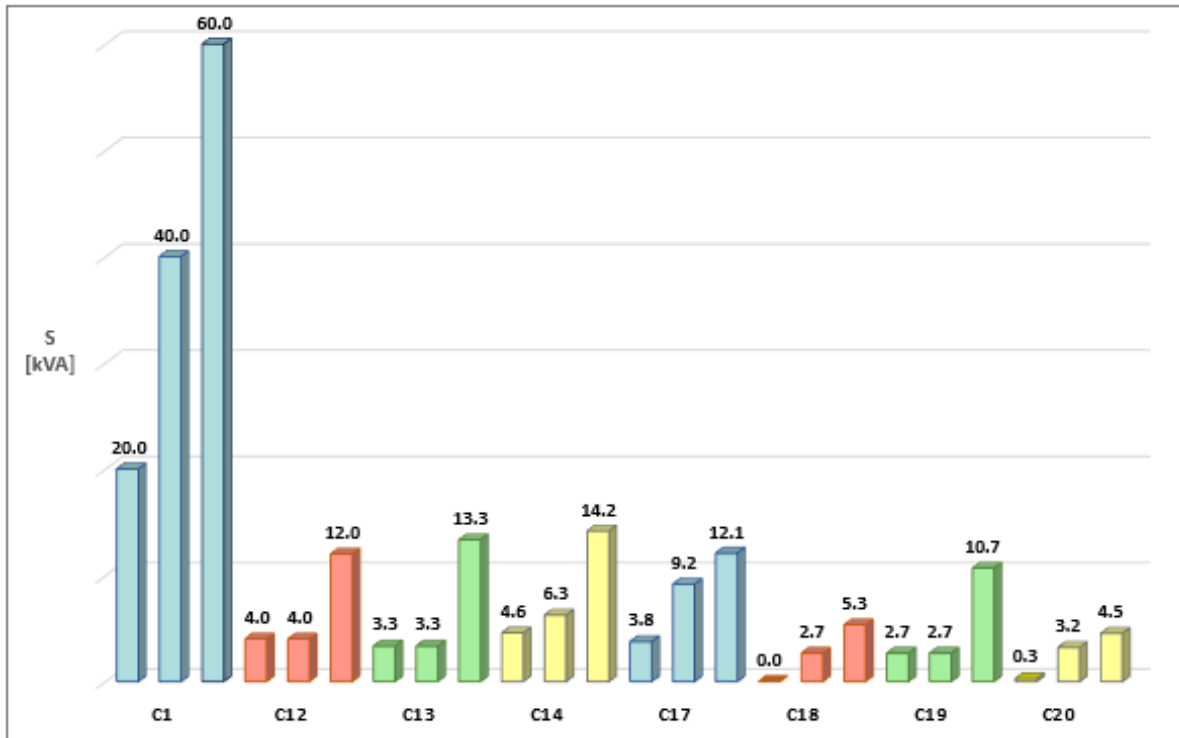


Figura 3-16. Potencias monofásicas de cada fase del feeder Comercial en el escenario fuertemente desequilibrado

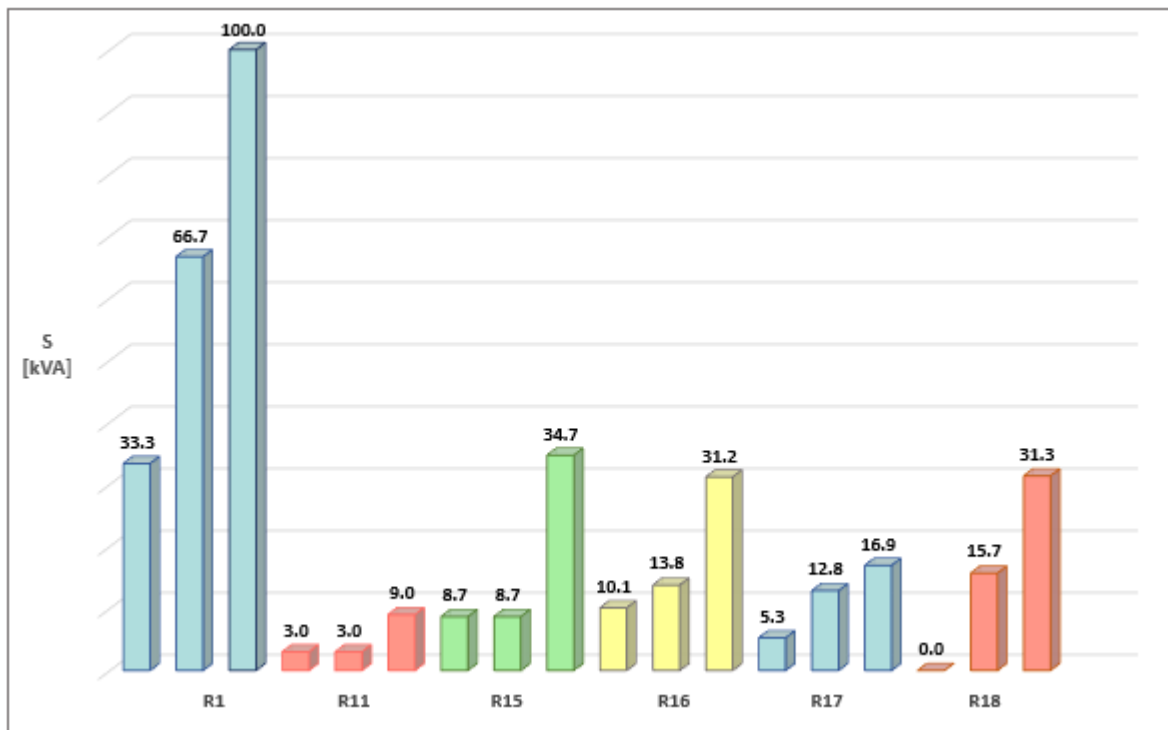


Figura 3-17. Potencias monofásicas de cada fase del feeder Residencial en el escenario fuertemente desequilibrado

La evolución diaria del consumo de potencia total que demanda cada fase en del escenario fuertemente desequilibrado puede verse en la Figura 3-18, para el feeder Comercial, y en la Figura 3-19, para la red completa.

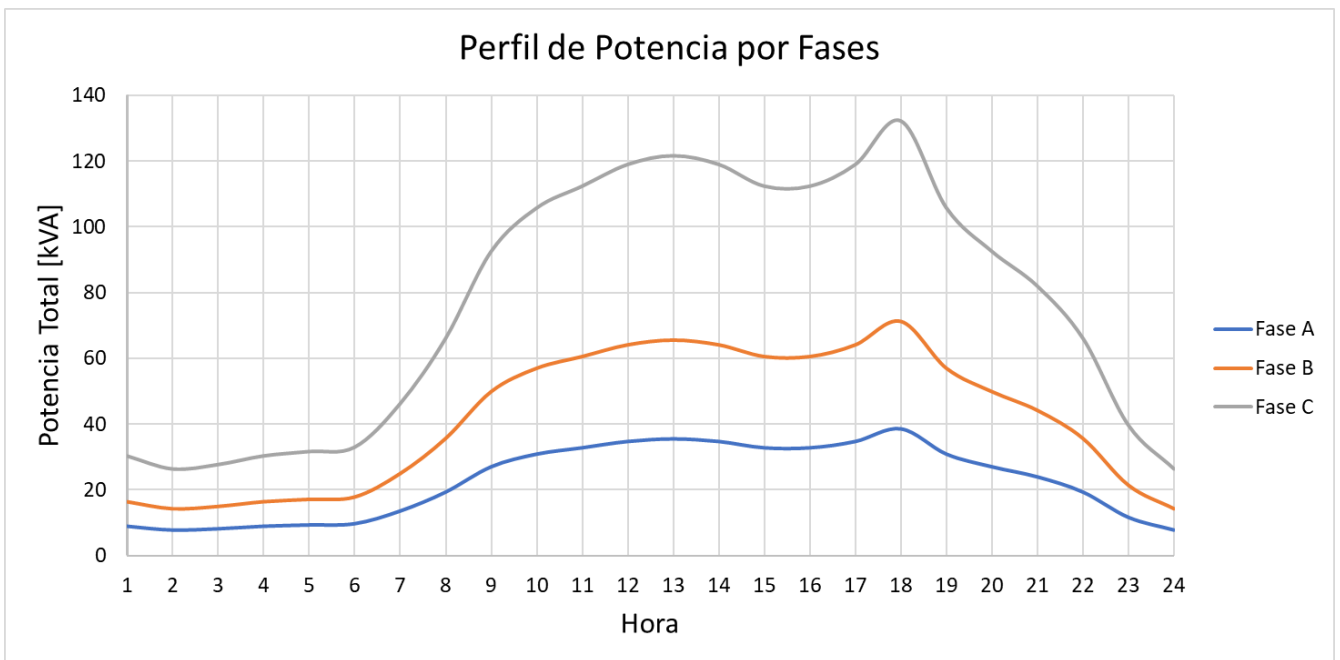


Figura 3-18. Perfil de Potencia del escenario fuertemente desequilibrado del feeder Comercial

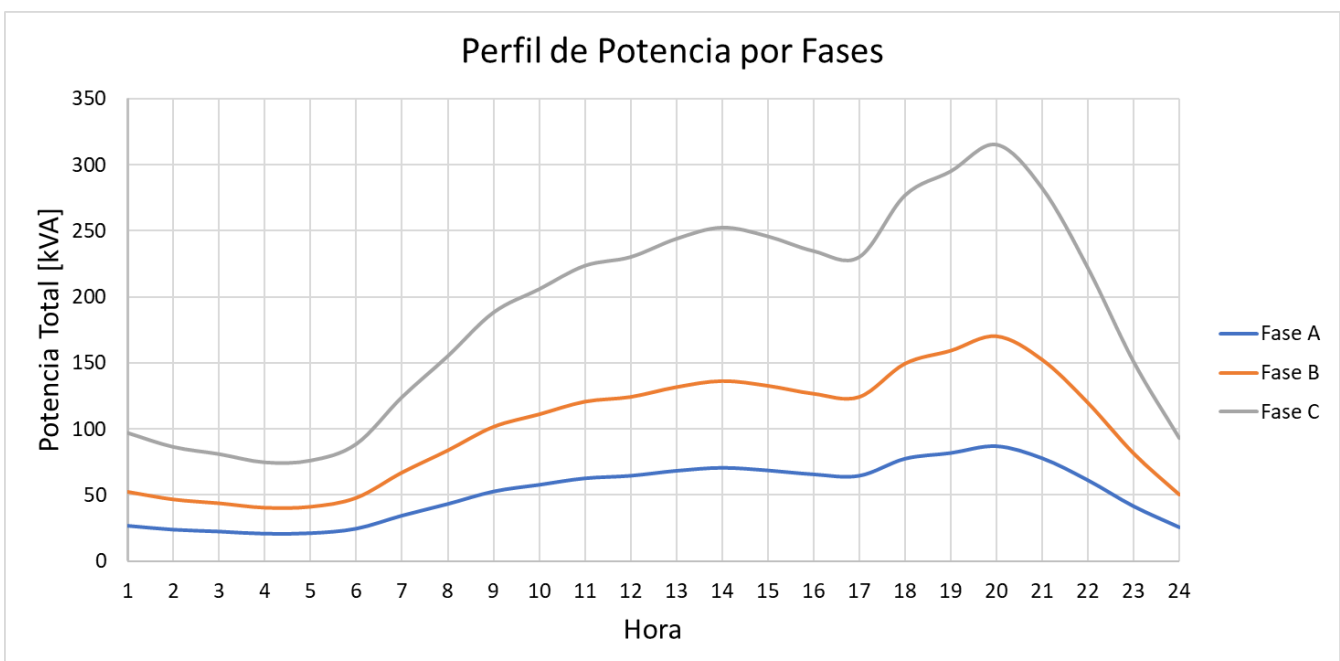


Figura 3-19. Perfil de Potencia del escenario fuertemente desequilibrado de la red

Casos de simulación del proyecto

Los distintos niveles de desequilibrio no serán estudiados para todas las configuraciones de puesta a tierra descritas en los apartados 3.1 y 3.2, la siguiente tabla muestra qué casos se van a simular.

Tabla 3-11. Tabla guía de las simulaciones

| Caso | Escenario de desequilibrio | | | |
|------|-----------------------------------|--------------------------|------------------------------|----------------------------|
| | Perfectamente Equilibrado | Levemente Desequilibrado | Moderadamente Desequilibrado | Fuertemente Desequilibrado |
| 1 | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |
| 2 | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |
| 3 | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |
| 4 | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |
| 5 | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |
| 6 | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |
| 7 | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |
| 8 | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |
| 9 | ✓ | ✗ | ✗ | ✓ |
| 10 | ✓ | ✗ | ✗ | ✓ |

Como puede verse en la tabla, las distintas configuraciones de puesta a tierra y de nivel de desequilibrio originan 40 combinaciones. Sin embargo, en el caso 9 y 10 únicamente se realizarán las simulaciones de los escenarios perfectamente y fuertemente desequilibrado, consecuentemente se llevará a cabo un total de **36 simulaciones**.

4 HERRAMIENTAS DE SIMULACIÓN

Una vez se han descrito las redes objeto de estudio, se procede a presentar las herramientas usadas en la simulación de cada uno de los casos que se encuentran en la tabla 3-12, además de ello, se muestran y se comentan los comandos que han sido empleados. En primer lugar, se ha usado un software específico llamado OpenDSS, encargado de realizar los cálculos eléctricos. Este software genera unos resultados que son tratados con MatLab para que de este modo se tenga facilidad a la hora de trabajar con esta gran cantidad de datos que se obtiene tras hacer un total de 36 simulaciones.

4.1 OpenDSS

OpenDSS es un simulador de sistemas de distribución de energía eléctrica diseñado para apoyar la integración en la red de los recursos energéticos distribuidos (DER) y la modernización de la misma. Permite a los ingenieros realizar análisis complejos, utilizando una plataforma flexible, personalizable y fácil de usar, pensada específicamente para responder a los retos actuales y futuros del sistema de distribución, proporcionando una base para comprender e integrar las nuevas tecnologías y recursos.

Este software especializado es desarrollado por EPRI (Electric Power Research Institute) en 1997, principalmente por el ingeniero Roger Dugan, fue concebido originalmente para modelar sistemas de generación distribuida o sistemas de servicios públicos; sin embargo, con el tiempo se fueron agregando distintas funcionalidades para estudiar la incidencia de energías alternativas o de redes inteligentes.

En la actualidad, el software cuenta con diversos tipos de análisis para los modelos desarrollados en él, siendo este muy flexible, ya que está diseñado para ser modificado adaptándose de esta manera a los cambios tecnológicos futuros.

OpenDSS es un programa ejecutable en forma de scripts donde los modelos deben realizarse con datos de parámetros ingresados mediante un código. Es decir, hay que definir todos los elementos que componen la red, así como los parámetros de los mismos y el modo de solución que vaya a ser empleado.

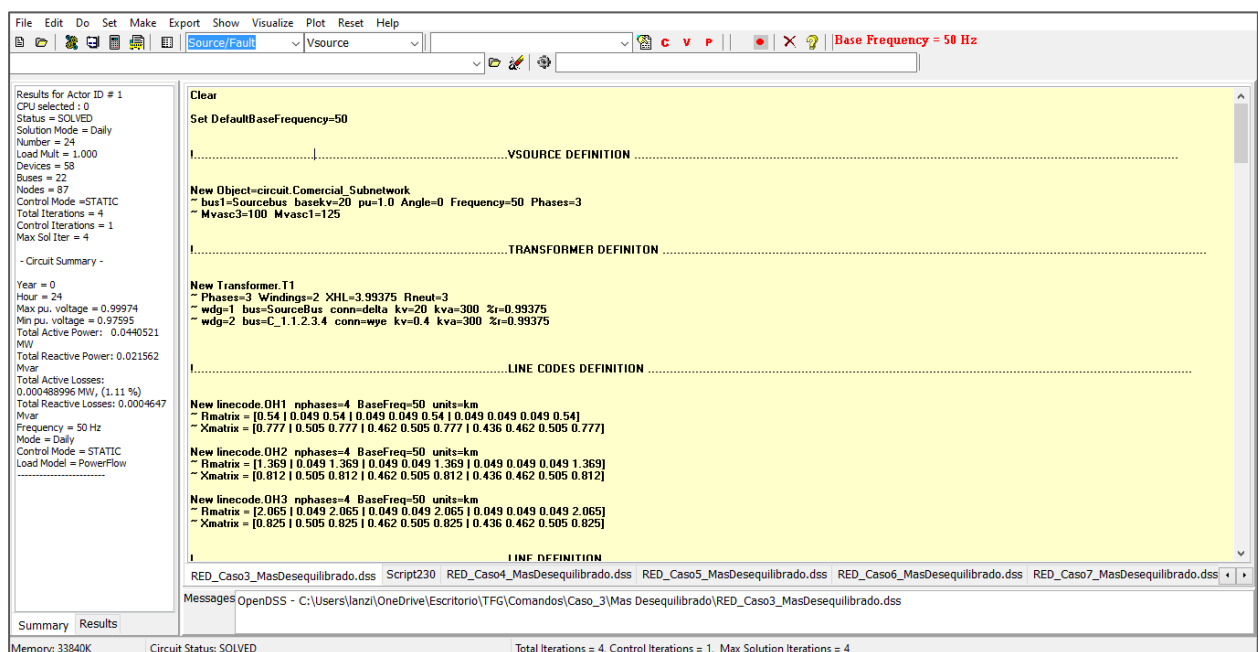


Figura 4-1. Ventana principal de OpenDSS

A continuación, se detalla el modelado del código base empleado para definir tanto la arquitectura de los elementos que componen las redes, como los parámetros de los mismos, así como el método de cálculo. Es importante resaltar que el concepto de “Bus” en esta herramienta, hace referencia al nudo dónde esté posicionado el elemento a definir.

4.1.1 Fuente de Tensión

Para definir un nuevo circuito, se emplea el objeto fuente de tensión, un equivalente Thévenin del sistema de baja tensión. Para ello se han usado los siguientes comandos:

| | |
|------------------|--|
| Bus1 | Nombre del nudo donde se encuentra la fuente de tensión. |
| Basekv | Tensión de línea base de la fuente de tensión. |
| Pu | Tensión en p.u. al que está trabajando la fuente de tensión. |
| Angle | Ángulo base, en grados, de la fuente de tensión. |
| Frequency | Frecuencia de la fuente. |
| Phases | Número de fases. |
| Mvasc3 | Potencia de cortocircuito trifásico en MVA. |
| Mvasc1 | Potencia de cortocircuito monofásico en MVA. |

Las potencias de cortocircuito son proporcionadas por CIGRE. El código mediante el cual definimos la fuente de tensión en la red comercial toma la siguiente forma:

```
New Object=circuit.Comercial_Subnetwork
~ bus1=Sourcebus basekv=20 pu=1.0 Angle=0 Frequency=50 Phases=3
~ Mvasc3=100 Mvasc1=125
```

4.1.2 Transformador

Se muestran a continuación las propiedades utilizadas para definir el transformador.

| | |
|-----------------|---|
| Phases | Número de fases. |
| Windings | Número de devanados. |
| XHL | Reactancia de cortocircuito del transformador expresada en tanto por ciento. Se hará un ejemplo práctico en la red comercial de como se obtiene este parámetro. Se asume que la reactancia de cortocircuito es la reactancia del transformador. |

$$XHL = \frac{X_{cc}}{Z_{Base}} * 100$$

$$Z_{Base} = \frac{U_{Base}^2}{S_{Base}}$$

$$XHL = \frac{X_{cc} * S_{Base}}{U_{Base}^2} * 100$$

Teniendo en cuenta que $X_{cc} = 0.0213 \Omega$, $S_{Base} = 0.3 \text{ MVA}$ y $U_{Base} = 0.4 \text{ kV}$, XHL toma un valor de 3.99 %.

| | |
|--------------|---|
| Rneut | Resistencia del neutro a tierra en ohmios para este devanado. |
| wdg | Número entero que representa el devanado que se convertirá en el devanado activo para los siguientes datos. |
| Bus | Nudo al que se conecta el devanado en cuestión. |
| conn | Conexión de este devanado. Delta para los bancos conectados en triángulo y wye para bancos en estrella. |
| kv | Tensión nominal del devanado. |
| kva | Potencia aparente del transformador. |
| % r | Resistencia de cortocircuito del transformador, expresada en porcentaje. Se estima que la resistencia de cortocircuito es la resistencia del transformador. |

$$XHL = \frac{X_{cc}}{Z_{Base}} * 100$$

$$Z_{Base} = \frac{U_{Base}^2}{S_{Base}}$$

$$XHL = \frac{X_{cc} * S_{Base}}{U_{Base}^2} * 100$$

Se presenta el fragmento de código usado para modelar el transformador de la red comercial en OpenDSS:

```
New Transformer.T1
~ Phases=3 Windings=2 XHL=3.99375 Rneut=3
~ wdg=1 bus=SourceBus conn=delta kv=20 kva=300 %r=0.99375
~ wdg=2 bus=C_1.1.2.3.4 conn=wye kv=0.4 kva=300 %r=0.99375
```

4.1.3 Código de línea

Cada tipo de conductor posee un código de línea propio en el que se introducen las propiedades del mismo. Seguidamente se muestra como se definen estos parámetros eléctricos.

| | |
|-----------------|---|
| nphases | Número de fases |
| BaseFreq | Frecuencia base a la que se especifican los valores de impedancia |
| units | Unidades de longitud |
| Rmatrix | Valores reales de la matriz de impedancia de fase (resistencia), expresados en ohmios por unidad de longitud. Al tratarse de una matriz simétrica, no se introducen los valores de dicha matriz que se repiten, se define en forma de triángulo inferior. |
| | $R_{matrix} = [R_{aa} \mid R_{ba} \ R_{bb} \mid R_{ca} \ R_{cb} \ R_{cc} \mid R_{na} \ R_{nb} \ R_{nc} \ R_{nn}]$ |
| Xmatrix | Valores imaginarios de la matriz de impedancia de fase (inductancia), expresados en ohmios por unidad de longitud. Se define del mismo modo que su comando análogo, Rmatrix. |

$$X_{matrix} = [X_{aa} \mid X_{ba} \ X_{bb} \mid X_{ca} \ X_{cb} \ X_{cc} \mid X_{na} \ X_{nb} \ X_{nc} \ X_{nn}]$$

El fragmento de código empleado para definir el conductor OH1, propio de la red comercial, es el siguiente:

```
New linecode.OH1 nphases=4 BaseFreq=50 units=km
~ Rmatrix = [0.54 | 0.049 0.54 | 0.049 0.049 0.54 | 0.049 0.049 0.049 0.54]
~ Xmatrix = [0.777 | 0.505 0.777 | 0.462 0.505 0.777 | 0.436 0.462 0.505 0.777]
```

4.1.4 Líneas

Las líneas son un elemento polifásico definido por dos terminales o dos nudos; las propiedades usadas para definir las, en este orden, son:

| | |
|-----------------|---|
| Phases | Número de fases. Una línea tiene el mismo número de conductores por terminal que fases. |
| Bus1 | Nombre del nudo origen de la línea. |
| Bus2 | Nombre del nudo final de la línea. |
| LineCode | Nombre del código de línea que contiene las definiciones de impedancia del conductor en cuestión. |
| Length | Longitud del tramo de línea. |
| Units | Unidades de longitud. |

Se muestra el código empleado para definir la línea 1 de la red comercial:

```
New Line.Line_1
~ Phases=4 Bus1=C_1.1.2.3.4 Bus2=C_2.1.2.3.4
~ LineCode=OH1 Length=0.030 units=km
```

4.1.5 Perfil de carga

El objeto LoadShape permite introducir el perfil de carga de la red en un intervalo de tiempo definido, bien sean años, meses, días, horas, minutos o segundos. En este proyecto se estudian las redes desde un punto de vista diario. Para ello, se definen una serie de multiplicadores comprendidos entre 0 y 1, que serán aplicados a los valores de potencia base de las cargas. Se asume que para cada hora del día hay un único multiplicador. Los comandos utilizados para introducir el LoadShape del proyecto, son los siguientes:

| | |
|-----------------|---|
| npts | Número de puntos que se esperan al definir la curva del perfil de carga. |
| interval | Intervalo de tiempo entre los puntos de la curva, si no se especifica ninguna unidad de medida de tiempo, OpenDSS lo tomará en horas. |
| mult | Vector de valores multiplicadores. |
| Model | Número entero que define como variará la carga con la tensión, en caso de ser 1 la potencia de la carga será constante. |

A continuación, puede verse el código usado para modelar el perfil de carga de la red comercial:

```
New LoadShape.LS_C
~ npts=24 interval=1 mult=[0.23 0.2 0.21 0.23 0.24 0.25 0.35 0.50 0.70 0.80
0.85 0.90 0.92 0.90 0.85 0.85 0.90 1.00 0.80 0.70 0.62 0.50 0.30 0.20]
```

4.1.6 Cargas

Las cargas son un elemento que puede ser definido polifásica o monofásicamente. En el presente estudio, las definiremos de forma monofásica. Para OpenDSS las cargas son un objeto de un solo terminal, internamente considerado como un sumidero de corriente.

| | |
|-----------------|---|
| Phases | Número de fases de la carga en cuestión. |
| Bus1 | Nombre del nodo al que está conectado la carga. |
| conn | Modo de conexión, wye para cargas con conexión en estrella y delta para cargas con conexión en triángulo. |
| Basefreq | Frecuencia base para la que se define esta carga. |

| | |
|---------------|--|
| kv | Tensión base de la carga. Al estar conectadas en estrella se ha de especificar la tensión fase-neutro (L-N), como se trata de cargas monofásicas, esta tensión será igual a la tensión de línea (L-L) dividida entre la raíz de 3. |
| | $U_{LN} = \frac{U_{LL}}{\sqrt{3}}$ |
| kva | Definición de la carga base en kVA. |
| pf | Factor de potencia. |
| vminpu | Tensión mínima en por unidad para el que se aplica el modelo de carga definido. Por debajo de este valor, el modelo de la carga pasa a un modo de impedancia constante. |
| vmaxpu | Tensión máxima en por unidad para el que se aplica el modelo de carga definido. Por encima de este valor, el modelo de la carga pasa a un modo de impedancia constante. |
| Daily | Nombre del perfil de carga diario. |

El fragmento de código utilizado para definir la primera carga de la red comercial es el siguiente:

```

New Load.Load_C1_phaseA
~ phases=1 Bus1=C_1.1.4 conn=wye Model=1 Basefreq=50
~ kv=(0.4 3 sqrt /) kva=40 pf=0.9 vminpu=0.60 vmaxpu=2 Daily=LS_C

New Load.Load_C1_phaseB
~ phases=1 Bus1=C_1.2.4 conn=wye Model=1 Basefreq=50
~ kv=(0.4 3 sqrt /) kva=40 pf=0.9 vminpu=0.60 vmaxpu=2 Daily=LS_C

New Load.Load_C1_phaseC
~ phases=1 Bus1=C_1.3.4 conn=wye Model=1 Basefreq=50
~ kv=(0.4 3 sqrt /) kva=40 pf=0.9 vminpu=0.60 vmaxpu=2 Daily=LS_C

```

4.1.7 Puestas a tierra

Para introducir las puestas a tierra, se usa el objeto Reactor. Es un elemento de impedancia constante, definido por dos terminales, si no se especifica el segundo terminal, este es por defecto una conexión a tierra. El elemento Reactor no tiene acoplamiento entre fases y se define con las siguientes propiedades:

| | |
|---------------|---------------------------------|
| Phases | Número de fases. |
| Bus1 | Nombre del primer terminal. |
| R | Resistencia en serie en ohmios. |
| X | Resistencia en serie en ohmios. |

Se muestra un ejemplo del código empleado para introducir una puesta a tierra de 3 ohmios en la carga 12:

```
New Reactor.Reactor_C12 phases=1 bus1=C_12.4 R=3 X=0
```

4.1.8 Método de solución

Al contrario que en los apartados anteriores, el método de solución no se considera un objeto en OpenDSS, sino que se trata de una serie de comandos que se han de introducir en función de lo que el programador quiera estudiar. Los comandos que se han utilizado para resolver las redes de este estudio se presentan a continuación:

| | |
|---------------------|---|
| VoltageBases | Vector de tensiones de línea del circuito. |
| CalcV | Calcula la tensión base de cada nudo a partir del vector de tensiones definido en el comando anterior |
| mode | Especifica el método de solución. |
| Solve | Ejecuta el modo de solución especificado. |
| maxcontrol | Número máximo de iteraciones por solución. |
| stepsize | Establece el tamaño de pasos de tiempo. |
| number | Especifica el número de pasos de tiempo o soluciones a ejecutar. |

Tanto en la red comercial como en la residencial, el fragmento de código que se ha implementado es el que se muestra a continuación:

```
Set VoltageBases=[20 0.4]  
CalcV  
solve maxcontrol=100  
set controlmode=static  
set mode=daily stepsize=1h number=24  
solve
```

4.2 MatLab

Como ya se ha comentado, se usará el famoso sistema de álgebra computacional llamado MatLab, que está orientado a matrices y cálculos numéricos. MatLab tiene un lenguaje de programación propio denominado lenguaje “M”. El uso de este software surge de la necesidad de gestionar los resultados que nos proporciona OpenDSS. Todo esto es posible gracias a la interfaz integrada en la herramienta MatLab, que le permite comunicarse con OpenDSS sin necesidad de usar la interfaz gráfica de este.

De este modo se automatiza con la implementación de algoritmos, la representación, almacenamiento y gestión de los datos de las variables que se consideran de interés para cada uno de los casos de simulación. Para ello, se ha seguido el siguiente procedimiento.

Inicialización de OpenDSS y selección del fichero

En primer lugar, se ejecutan comandos para abrir OpenDSS y así acceder a sus funciones y a los resultados de la solución archivo “DSS” que sea seleccionado.

Extracción de los resultados de OpenDSS

Los datos que interesa extraer de OpenDSS en este proyecto son las tensiones de fase-neutro, las tensiones de fase-fase, las tensiones de neutro, intensidades y pérdidas del circuito. Estos resultados son exportados por OpenDSS en un archivo csv para cada magnitud. Dichos archivos csv se tienen que filtrar con la información que sea conveniente para generar matrices en MatLab que contengan las variables que deseemos. Estas matrices reflejan los valores de las magnitudes eléctricas de cada nudo (en las filas) para cada hora del día (en las columnas).

Tratamiento de los datos extraídos

Operando con las magnitudes eléctricas obtenidas tras la extracción de resultados, se consiguen indicadores del funcionamiento de la red, dichos indicadores sirven para comparar los diferentes casos de estudio del proyecto. Estos indicadores se definen en la siguiente sección de este documento.

5 RESULTADOS DE SIMULACIÓN

Tras haber llevado a cabo la simulación diaria de la red para cada topología de puesta a tierra y en cada uno de los escenarios de desequilibrio, se procede a presentar los resultados de la simulación. Con objeto de conocer cuál es el comportamiento del feeder Comercial en cada caso de estudio definido en el Capítulo 3, se van a definir una serie de indicadores clave de rendimiento o KPI's, del inglés Key Performance Indicators. Cada uno de estos KPI's cuantificará o evaluará la evolución diaria de una magnitud concreta o bien, la relación que tienen algunas magnitudes.

Una vez hecho esto, se analizarán los resultados que origina cada indicador. Finalmente, se llevará a cabo una síntesis de los resultados, en la que se examina la relación de dependencia que tienen entre ellos algunos KPI's con el fin de llevar a cabo una vía de estudio paralela en la que se confirme la veracidad de las conclusiones obtenidas.

5.1 Definición de KPI's

En este apartado se van a definir los indicadores usados para describir el comportamiento de cada configuración de puesta a tierra y de cada escenario de desequilibrio de cargas.

Los primeros indicadores que se van a describir se refieren a las pérdidas de la red.

- Pérdidas de potencia activa (**PA**): Sumatorio de las pérdidas de potencia activa en cada línea y en cada carga la red a lo largo de un día completo
- Pérdidas de potencia reactiva (**PQ**): Análogamente, sumatorio de las pérdidas de potencia reactiva en cada línea y en cada carga la red a lo largo de un día completo

En segundo lugar, se van a describir indicadores relativos a los niveles de tensión de la red.

- Desequilibrio de tensiones: Valor del desequilibrio de tensión promedio de todos los nudos para cada hora del día. Se generan dos KPI's, uno referido a las tensiones fase-neutro (T_{F-N}), denominado **DT_{F-N}** y otro referido a las tensiones fase-tierra (T_{F-T}), llamado **DT_{F-T}**.

La relación que tienen entre ellas las tensiones fase-tierra y fase-neutro es la siguiente, donde N_T hace referencia a tensión del neutro.

$$T_{FT} = T_{FN} - N_T$$

Para cuantificar el desequilibrio de tensión en un nudo concreto y a una cierta hora del día, se usa la siguiente expresión donde el subíndice i hace referencia al nudo mientras que el subíndice j hace referencia a la hora.

$$\text{Des Ten}_{[i,j]} (\%) = \frac{V_{A,B,C}^{\text{MAX}}[i,j] - V_{A,B,C}^{\text{MED}}[i,j]}{V_{A,B,C}^{\text{MED}}[i,j]} * 100$$

Dónde V_{MAX} es la tensión máxima de las tres fases y V_{MED} es la tensión promedio.

- Tensión del neutro (N_T): La tensión del neutro sirve como indicador del sistema, ya que idealmente este elemento de la red ha de tener una tensión lo más cercana al cero. Los escenarios en los que la tensión del neutro sea inferior resultarán, a priori, de mayor interés.
- Secuencia de tensiones directa (T_D), inversa (T_I) y homopolar (T_{HOM}). Estas tensiones son muy importantes a la hora de analizar los desequilibrios, puesto que los resultados de tensiones que se obtienen al resolver el circuito desequilibrado son la suma de aquellas tres tensiones.
- Máxima caída de tensión diaria (ΔT_{MAX}): Este indicador compara las tensiones de cada una de las fases a cada hora del día y devuelve la diferencia de tensión que hay entre los valores máximos y mínimos de la red.
- Tensión de las fases (T_{MEDIA}): Este KPI es el valor de tensión promedio en p.u que a cada hora posee el conjunto de nudos de la red en sus tres fases A, B y C.
- Subtensiones: Se define una subtensión si la tensión de un nudo es igual o inferior al 95% de la tensión nominal, es decir, 230 V. Cuando esto ocurre en alguna de las fases, se activa un contador que devuelve el número de veces que ha ocurrido una subtensión en la red ($N.^{\circ} SUB$). Además, dicho contador almacena el valor de tensión que tiene dicha subtensión, de modo que es posible conocer cuál es el promedio de todas las subtensiones que registra a lo largo del día (ST_{MEDIA})

En último lugar, se van a describir los indicadores referidos a los niveles de intensidades de la red.

- Desequilibrio de intensidad (DI): De forma paralela al desequilibrio de tensión, para cuantificar el desequilibrio de tensión en un nudo concreto y a una cierta hora del día se usa la siguiente expresión.

$$Des\ Int_{[i,j]} (\%) = \frac{I_{A,B,C}^{MAX}[i,j] - I_{A,B,C}^{MED}[i,j]}{I_{A,B,C}^{MED}[i,j]} * 100$$

Se toma como KPI el valor del desequilibrio de intensidad promedio de todos los nudos para cada hora del día.

- Secuencia de intensidades directa (I_D), inversa (I_I) y homopolar (I_{HOM}). Como ocurre con la secuencia de tensiones, los resultados de intensidad que se obtienen al resolver el circuito desequilibrado son la suma de aquellas tres intensidades.
- Intensidad del neutro (I_N): La intensidad del neutro es un buen indicador del sistema. Al igual que la tensión del neutro, la intensidad ha de ser lo más cercana a cero. Los escenarios en los que la intensidad del neutro sea inferior, resultarán a priori de mayor interés.
- Sobreintensidades ($N.^{\circ} SI$): Se define una sobreintensidad cuando la intensidad que circula por un

conductor es mayor que la intensidad máxima admisible que este tiene. Puede verse la intensidad máxima admisible de los conductores del feeder Comercial en la Tabla 5-1.

Tabla 5-1- Intensidad Máxima Admisible de los conductores del feeder Comercial

| Comercial | | |
|------------------|----------------------------|-----------------------------|
| Tipo de cable | Sección [mm ²] | Intensidad Máxima Admisible |
| OH1 | 70 | 220 |
| OH2 | 25 | 125 |
| OH3 | 16 | 97 |

Si en una hora determinada del día el conductor de una fase se encuentra en condiciones de sobreintensidad en al menos un nudo, se activa un contador que devuelve el número de veces que esto ocurre en la red a lo largo del día para un determinado tipo de conductor.

Dicho de otro modo, si en una misma hora hay un mismo conductor en condiciones de sobreintensidad en dos fases a la vez, el contador suma dos unidades; pero si un mismo conductor presenta sobreintensidades en dos o más nudos simultáneamente, el contador solo sumará una unidad.

5.2 Discusión de resultados

Una vez definidos los indicadores o KPI's del sistema, en este apartado se presentan y se discuten los resultados que mejor definen cual es el comportamiento de la red bajo cada configuración de puesta a tierra. A lo largo de la lectura de este apartado, se ha de tener en cuenta que el objetivo más importante de este análisis es el de hallar qué configuraciones de puesta a tierra presentan un comportamiento más estable a medida que los desequilibrios en los consumos de las cargas se hacen cada vez más extremos.

En primer lugar, se van a presentar los KPI's que hacen referencia a las pérdidas, para después presentar los relativos a las tensiones e intensidades. Por último, se muestra una síntesis global de los resultados con el fin de demostrar que las conclusiones que se obtienen tras analizar los KPI's son correctas.

5.2.1. Pérdidas

Seguidamente se muestran los resultados de los indicadores de pérdidas. Hay que resaltar que las pérdidas de potencia activa y potencia reactiva son independientes al caso de estudio o configuración de puesta a tierra, pues estas solo varían en función del escenario de desequilibrio de cargas al que se vea sometida la red.

Las Tablas 5-2 y 5-3 recogen los resultados de las pérdidas totales de potencia activa, P_A , y reactiva, P_Q , así como el aumento porcentual que estas tienen los escenarios desequilibrados con respecto al escenario equilibrado.

Tabla 5-2. Pérdidas Totales de Potencia Activa

| Pérdidas Activa Totales Diarias (kW) | | | |
|---|--------------------------|------------------------------|----------------------------|
| Perfectamente Equilibrado | Levemente Desequilibrado | Moderadamente Desequilibrado | Fuertemente Desequilibrado |
| 118.90 | 123.39 (+4%) | 142.43 (+20%) | 252.95 (+113%) |

Tabla 5-3. Pérdidas Totales de Potencia Reactiva

| Pérdidas Reactiva Totales Diarias (kvar) | | | |
|---|--------------------------|------------------------------|----------------------------|
| Perfectamente Equilibrado | Levemente Desequilibrado | Moderadamente Desequilibrado | Fuertemente Desequilibrado |
| 119.69 | 121.7 (+2%) | 132.15 (+11%) | 200.58 (+69%) |

Al observar ambas tablas, puede verse que tanto las pérdidas de potencia activa como las de potencia reactiva siguen la misma tendencia al aumentar los niveles de desequilibrio, aunque las pérdidas de potencia activa son más sensibles al desequilibrio que las pérdidas de potencia reactiva. Esto es debido al carácter capacitivo que tienen las cargas de la red.

A la hora de diseñar los escenarios de desequilibrio en el consumo de cargas monofásicas, la potencia instalada en todos los casos es la misma. Hay que tener en cuenta que la presencia de cargas desbalanceadas genera a su vez intensidades desbalanceadas. Un aumento en la intensidad promedio de las líneas genera un aumento exponencial en las pérdidas de la red, pues estas pérdidas son proporcionales al cuadrado de la intensidad.

Las Figuras 5-1 y 5-2 muestran la progresión que sufren las pérdidas del feeder Comercial a lo largo del día a través de los diferentes escenarios de desequilibrio.

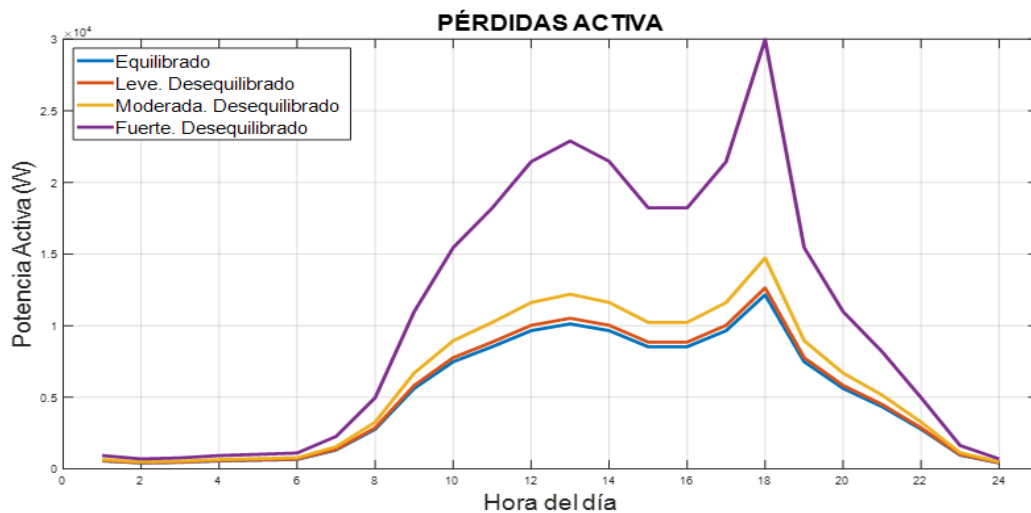


Figura 5-1. Pérdidas de Potencia Activa

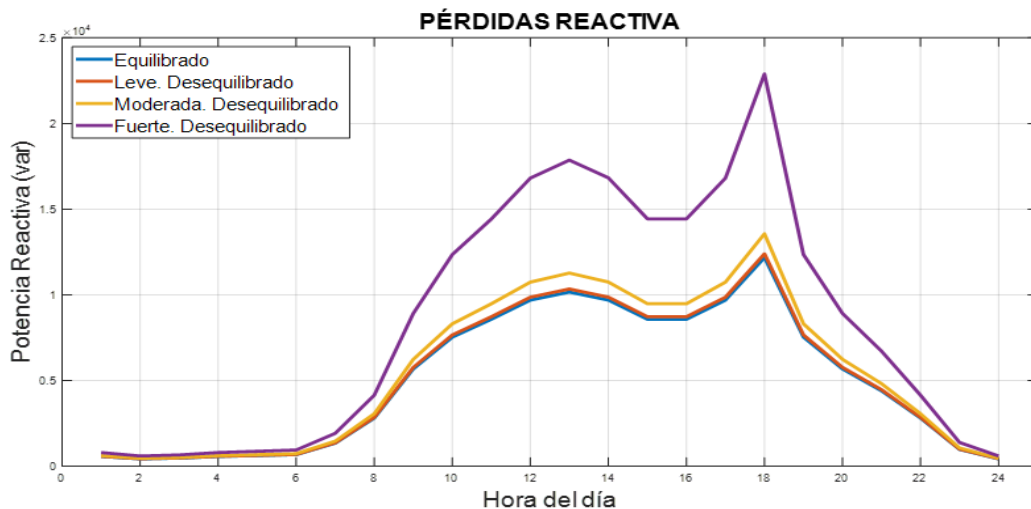


Figura 5-2. Pérdidas de Potencia Reactiva

5.2.2. Tensiones

Se presentan a continuación los resultados de las tensiones de la red en cada caso de estudio. Como ya se ha comentado previamente en este documento, las redes de distribución de baja tensión son intrínsecamente desequilibradas, esto es debido a que las impedancias propias y mutuas de cada fase son asimétricas por definición. Es por ello que, a pesar de que el escenario de consumo de cargas esté perfectamente equilibrado, la red presenta desequilibrios de tensiones.

En lo referido a dichas tensiones, estas aumentan de forma proporcional en cada caso de estudio, en función del escenario de desequilibrio de cargas al que esté sometida la red. De este modo, las gráficas que surgen al representar la evolución diaria de alguna magnitud referida a la tensión, siguen el mismo patrón para cada escenario de carga. La diferencia radica en el orden de magnitud que toman las tensiones, siendo este orden de magnitud cada vez mayor conforme aumentan los niveles de desequilibrio de consumo de cargas.

Para mostrar como es el desequilibrio de tensión implícito de la red, a pesar de que las cargas monofásicas que componen a una carga trifásica estén perfectamente equilibradas entre sus fases, se muestra la Figura 5-3, dónde puede verse la evolución del desequilibrio de tensión en cada topología de puesta a tierra para el tramo horario comprendido entre las 8 y 22 horas del día, ya que este es el tramo horario más representativo.

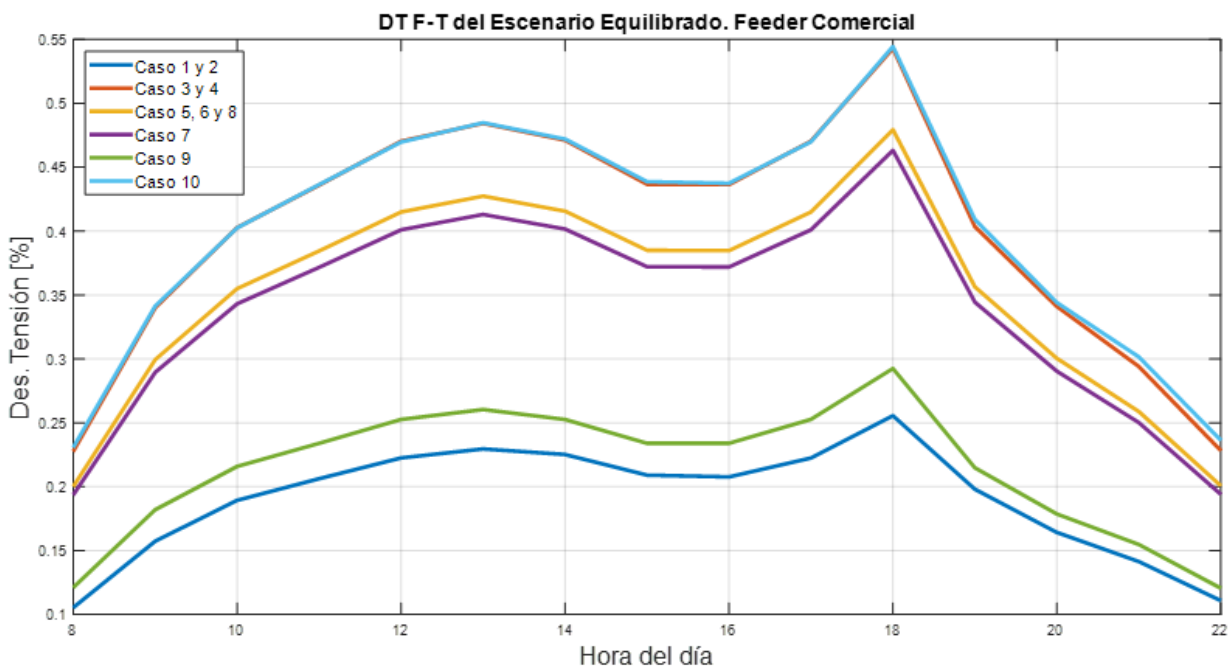


Figura 5-3. Desequilibrio de Tensión del escenario perfectamente equilibrado para cada caso de estudio

En dicha gráfica, el desequilibrio de tensión se ha calculado a través de las tensiones fase-tierra. El desequilibrio de tensión es una medida del orden de magnitud que hay en la diferencia de tensión que tiene cada fase. Si se mide el desequilibrio de tensión para la tensión fase-neutro y para la tensión fase tierra, se concluye que es prácticamente el mismo en todos los nudos de la red. Esto es debido a que la tensión fase-tierra se calcula restandole la tensión del neutro a la tensión fase-neutro, es decir, la diferencia entre ambas es siempre la tensión del neutro.

Como puede verse en la Figura 5-3, el desequilibrio de tensión es menor en los casos 1 y 2, en los que no hay ninguna PT a excepción del secundario del transformador. En segundo lugar, se encuentra el caso 9, en el que ambos feeder están mallados con un valor bajo de resistencia a tierra.

Los casos 3 y 4, donde las PT se encuentran únicamente en los nudos terminales, son los casos en los que el desequilibrio de tensión es mayor. A su vez, el caso 10, en el que existe mallado con el feeder residencial y las resistencias a tierra son muy elevadas, alcanza unos valores de desequilibrio muy similares a los de los casos 3

y 4.

Las topologías con PT en nudos bifurcación, casos 5 y 6, y con PT en todos los nudos, casos 7 y 8, presentan unos valores de desequilibrio de tensión muy parecidos; ambos mejoran significativamente respecto a los casos 3 y 4, sobre todo en el caso 7, que destaca por su bajo valor de resistencia a tierra.

Para aclarar los motivos por los que cada topología presenta diferentes niveles de desequilibrio de tensión, se han de analizar las tensiones homopolares, pues estas dependen de las tensiones de puestas a tierra. El desequilibrio de tensión está fuertemente relacionado con la tensión homopolar. En un caso trifásico ideal, todo el valor de la tensión lo tendrá la fase secuencia directa, quedándose tanto la secuencia homopolar e inversa con tensión nula y solo existirá caída de tensión en la secuencia directa. Por dicho motivo, se han obtenido los valores de tensión de secuencia homopolar. En la Figura 5-4 se muestran dichos valores en un escenario equilibrado de cargas y para cada caso de estudio.

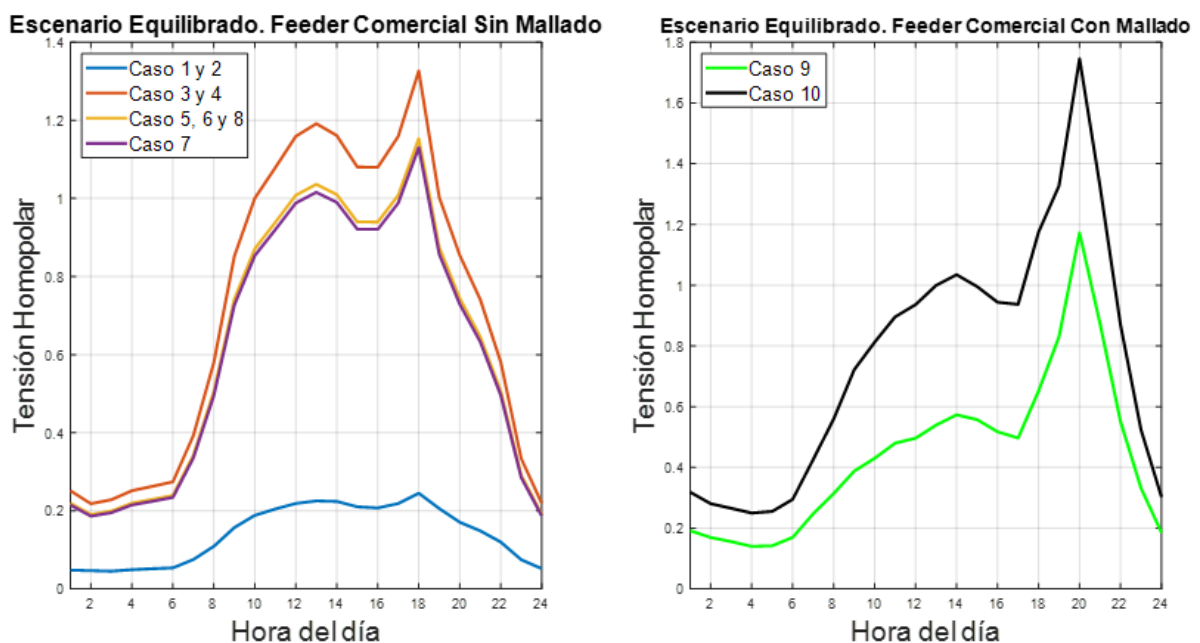


Figura 5-4. Tensión Homopolar del feeder Comercial bajo un escenario equilibrado

La tensión homopolar es un claro indicador de desequilibrio, si este aumenta, aquella también hace lo propio. Es por ello que los valores de tensión homopolar han de ser y son fielmente coherentes con los obtenidos anteriormente para el desequilibrio de tensión.

Según la figura 5.4, las topologías sin PT, casos 1 y 2, tienen unas tensiones homopolares inferiores a las del resto de casos. Al haber únicamente una puesta a tierra en el secundario del transformador, el circuito de PT no está cerrado y por tanto estas tensiones son casi nulas. Las topologías con PT en los nudos hacen que aumente la tensión homopolar porque cierran el circuito de PT; aunque mayor número de PT disminuye las tensiones homopolares. Las PT en nudos terminales (casos 3 y 4), presentan unos mayores niveles de tensión homopolar que las PT en nudos bifurcación. Cuanto mayor es la resistencia de PT, mayores son dichas tensiones. De este modo, se justifican las conclusiones obtenidas de la Figura 5-3.

Del mismo modo que se ha presentado la tensión homopolar, se hará lo propio con las tensiones directa e inversa, pues la suma de estas tres componentes da como resultado las tensiones reales del sistema. Para ello, se dispone de la Figura 5-5, situada a la izquierda de esta figura se han representado las tensiones de secuencia inversa del escenario equilibrado, mientras que las tensiones de secuencia directa se encuentran a la derecha.

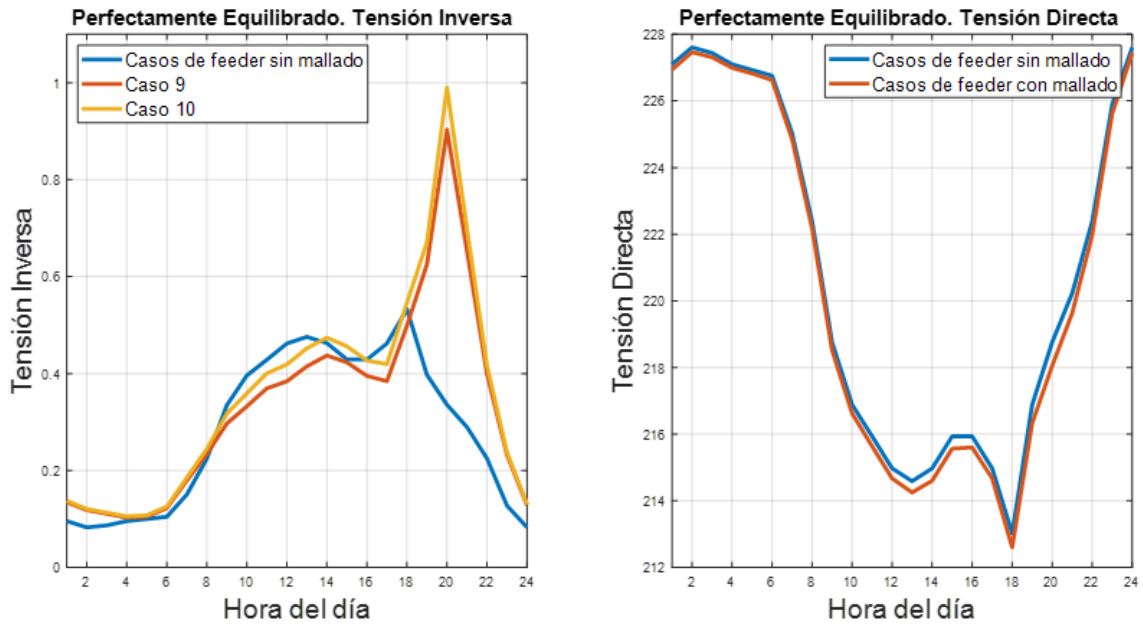


Figura 5-5. Tensiones Directas e Inversas del feeder Comercial

Si se comparan las figuras 5-5 y 5-4, es fácil concluir que las tensiones directa e inversa apenas tienen dependencia de las configuraciones de PT. Las tensiones de secuencia directa disminuyen si se mallan los feeder Comercial y Residencial, sin embargo, esta configuración mallada hace que aumenten las tensiones de secuencia inversa.

Seguiamente, se va a comprobar si los casos que anteriormente presentaban menores valores de desequilibrio de tensión tienen, al mismo tiempo, unas menores tensiones de neutro. Para ello se va a presentar en la Figura 5-6 la evolución diaria de tensión del neutro en cada caso de estudio. Se ha decidido graficar la tensión del escenario fuertemente desequilibrado para una representación más clara de dicha gráfica. En los escenarios equilibrado, levemente desequilibrado y moderadamente desequilibrado, el comportamiento de todos los casos es el mismo, aunque varía el orden de magnitud en que la tensión del neutro se manifiesta. Hay dos casos de estudio que presentan anomalías con respecto al resto de casos y por ello, se han representado aparte, en la gráfica que se muestra a la derecha de la Figura.

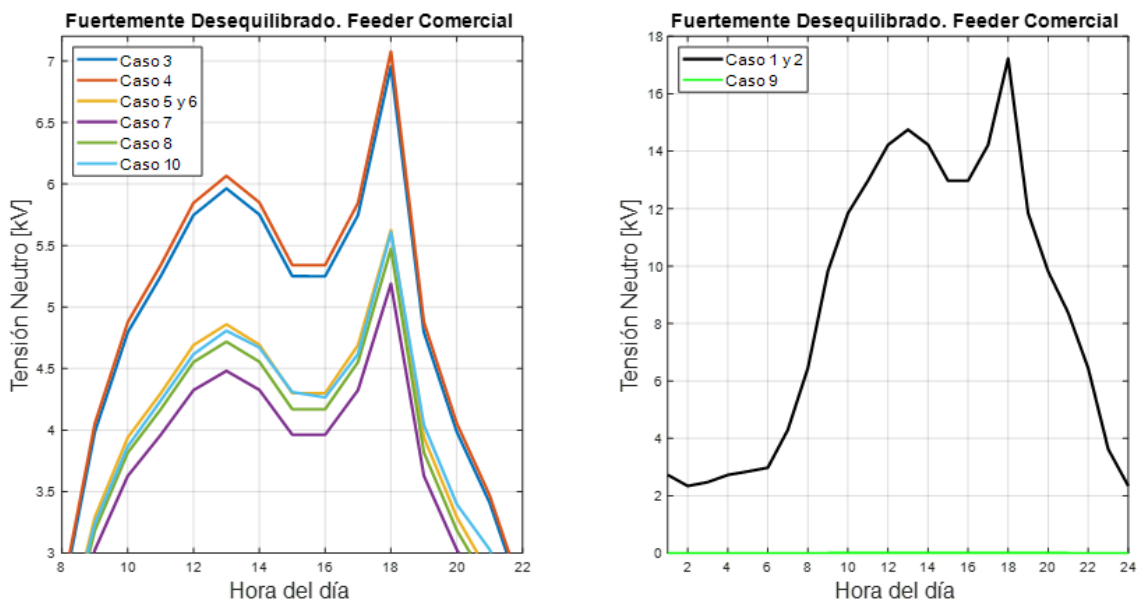


Figura 5-6. Tensión del Neutro del feeder Comercial bajo el escenario fuertemente desequilibrado

Como puede apreciarse en la gráfica situada a la izquierda de la Figura 5-5, hay una cierta correspondencia entre el aumento en la tensión del neutro en los casos con un desequilibrio de tensión mayor. La gráfica situada a la derecha rompe esta correspondencia para los casos sin PT, casos 1 y 2, y para el caso 9, donde hay PT con resistencia nula en todos los nudos y, además, mallado de ambos feeders.

El caso 9 destaca positivamente por poseer una tensión de neutro muy inferior a la del resto de casos, es decir, este caso presenta una tensión de neutro muy estable frente a los desequilibrios. Esto es debido a que en este caso se han supuesto conductores ideales de PT que son capaces de evacuar grandes corrientes a tierra y de este modo, reducen la tensión del elemento neutro. Al sumar esto con su configuración de red mallada que permite estabilizar los niveles de tensión al distribuir la intensidad del neutro en ambos feeder, se obtiene una tensión de neutro en horas de consumo pico inferior a 0.2 kV, incluso en el escenario de desequilibrio más desfavorable.

Por otra parte, los casos 1 y 2 son los que tienen una tensión de neutro muy superior a la del resto. En estos dos casos no existe ninguna PT ni hay mallado de feeder, por lo que las tensiones que generan en el neutro las cargas desbalanceadas son absorbidas en su totalidad por este elemento, elevando la tensión de forma muy significativa.

En segundo lugar, se encuentran a los casos con PT en todos los nudos, casos 7 y 8, estos no tienen una configuración mallada ni resistencias nulas de tierra. Aun así su estabilidad de tensión del neutro es muy superior a la de los casos 1 y 2, debido precisamente a la presencia de un mayor número de PT. En el caso 7 el valor de resistencias de PT es inferior que el del 8, lo que induce a una disminución de tensión del neutro.

Los escenarios con PT en nudos bifurcación, casos 5 y 6, poseen una tensión de neutro superior a la de los casos 7 y 8, ya que el menor número de PT provoca un aumento en la tensión del neutro. Los casos 5 y 6 poseen una tensión de neutro muy próxima entre ellos.

El caso 10, a pesar de tener PT en todos los nudos y de estar mallado con el feeder comercial, tiene una tensión de neutro muy similar a la de los casos 5 y 6, aunque algo superior. Sus valores tan elevados de resistencia dificultan que el neutro evacue a tierra los excedentes de corriente, contribuyendo a elevar muchísimo sus niveles de tensión si lo comparamos con su caso homólogo, el caso 9.

Por último, los escenarios con PT en nudos terminales, casos 3 y 4, presentan una mayor inestabilidad en cuanto a la tensión de neutro si lo comparamos con el resto de escenarios que presentan PT; Aunque de igual modo, este escenario es mucho mejor en comparación con los casos 1 y 2, donde no existe PT.

El hecho de que el desequilibrio de tensión sea menor en los casos 1 y 2, no significa que la topología de estos casos sea la que mejor resiste los niveles de desequilibrio, hay que tener en cuenta más indicadores. Tras analizar la tensión del neutro, se puede comprobar que la inexistencia de PT es fundamental para que las tensiones de neutro disminuyan en caso de que haya desequilibrios, sirviendo de este modo como método de protección tanto a la red, a los equipos de consumo y a las propias personas

A continuación, se va a analizar qué ocurre con los niveles promedio de tensión de las fases a medida que las cargas se hacen cada vez más desbalanceadas, relacionando como influyen en este KPI los resultados obtenidos de los KPI's anteriores. Es decir, se va a comentar como afectan a las tensiones de las fases los desequilibrios de tensión y la tensiones del neutro

Para analizar los niveles de tensión promedio del feeder Comercial a lo largo de los diferentes casos de estudio, se dispone de la Figura 5-7. Se ha decidido graficar la tensión promedio del escenario fuertemente desequilibrado por arbitrariedad, ya que este KPI se ve muy poco afectado por el escenario de carga en que se encuentra la red. La figura en cuestión muestra el promedio de tensión la fase-tierra. Para una mejor visualización, se ha representado a la derecha, un zoom de la gráfica de la izquierda.

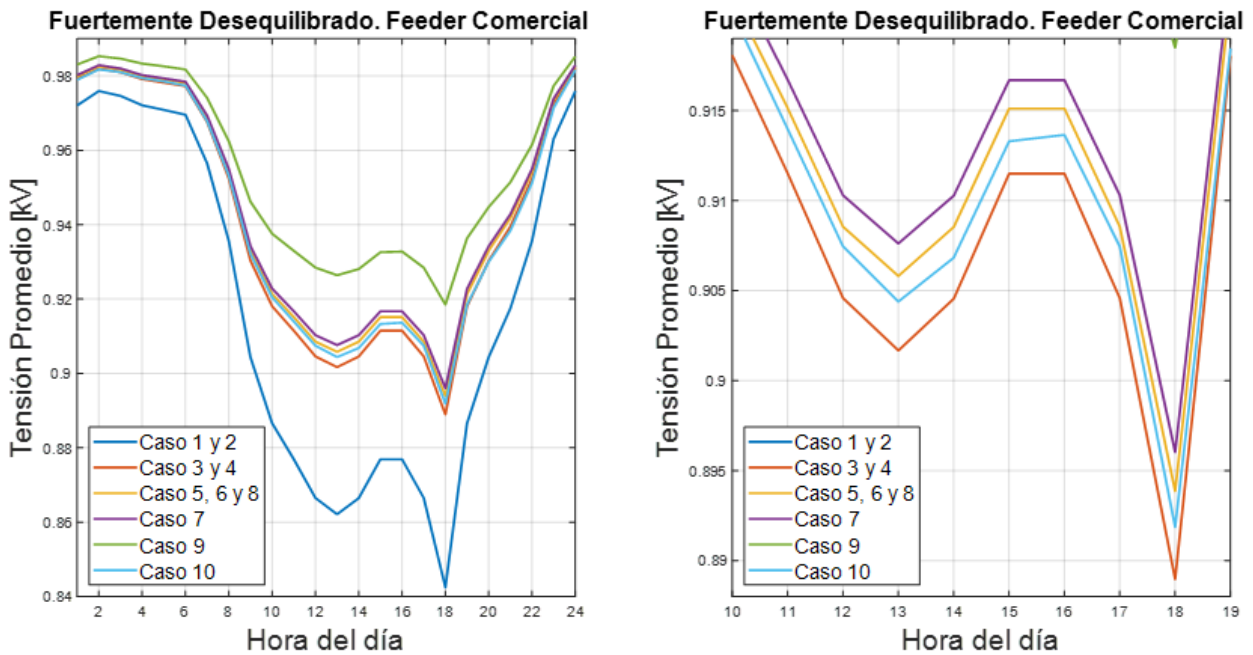


Figura 5-7. Tensión promedio del feeder Comercial bajo el escenario fuertemente desequilibrado

Al estar representado el promedio de las tensiones fase-tierra, los casos 9, 1 y 2 destacan sobre los demás porque es en estos casos donde la tensión del neutro toma valores límite. Cuando el valor promedio de tensión es calculado con las tensiones fase-neutro, los casos de estudio son fuertemente próximos entre sí, pero las conclusiones son invariantes.

Tras observar dicha figura, pueden sacarse unas conclusiones bastante parecidas a las obtenidas con las tensiones del neutro. Los casos que tenían una tensión de neutro más estable, poseen a su vez una tensión promedio más sólida. Por consiguiente, las topologías con PT y mallado, como ocurre en el caso 9, presentan el rango más estable de tensión promedio de fases; seguidas por las topologías con PT sin mallado, donde al disminuir el número de PT, disminuye a su vez la caída de tensión diaria. Por ello, el caso 7 es el segundo caso con tensiones más estables, ya que en este caso la red tiene PT en todos sus nudos. La influencia de PT en nudos bifurcación es mayor que en nudos terminales, lo que causa que los casos 5 y 6 tengan menos caída de tensión que los casos 3 y 4. Ambas parejas de casos tienen un comportamiento prácticamente convergente entre ellas, pero las parejas de casos 7-8 y 9-10, sufren penalizaciones de tensión en los casos donde la resistencia de PT aumenta.

Esto es coherente con el comportamiento de la red y con los resultados hasta ahora obtenidos. Para explicar por qué los casos con mayores niveles de tensión de neutro sufren al mismo tiempo mayores caídas de tensión, se ha de tener en cuenta lo siguiente: la presencia de tensiones en el neutro es directamente proporcional con la presencia de armónicos en la red, aumentando el valor de las pérdidas por histéresis y las pérdidas por corrientes de Foucault en los transformadores, incrementando su temperatura de funcionamiento y por consecuencia reduciendo su vida útil. Así pues, los transformadores afectados por corrientes armónicas sufrirán una desclasificación de la potencia (pérdida de capacidad) a la que pueden trabajar sin generar un calentamiento que exceda el normal.

Una vez más se reafirma que el hecho de que, aunque un caso presente mejores niveles de desequilibrio de tensión en sus fases, no implica que el comportamiento de ese caso sea bueno en otros aspectos. Tras analizar el indicador correspondiente a la tensión promedio de las fases, se concluye que sus resultados coinciden con los obtenidos al estudiar las tensiones del neutro.

Los niveles promedio de tensión están fuertemente relacionados con las subtensiones, ya que estas son consecuencia de los bajos niveles de tensión. La Tabla 5-4 muestra los datos del KPI relativo a las subtensiones que se ha obtenido en cada caso y para cada escenario de desequilibrio de cargas.

Tabla 5-4. Subtensiones del feeder Comercial. T_{F-N}

| | Subtensiones | | | | | | | |
|-----------|---------------------------|----------|--------------------------|----------|------------------------------|----------|----------------------------|----------|
| | Perfectamente Equilibrado | | Levemente Desequilibrado | | Moderadamente Desequilibrado | | Fuertemente Desequilibrado | |
| | Nº Veces | Promedio | Nº Veces | Promedio | Nº Veces | Promedio | Nº Veces | Promedio |
| 1 | 612 | 214.34 | 609 | 214.24 | 564 | 213.53 | 411 | 206.80 |
| 2 | 612 | 214.34 | 609 | 214.24 | 564 | 213.53 | 411 | 206.80 |
| 3 | 605 | 214.26 | 599 | 214.14 | 503 | 212.19 | 355 | 191.18 |
| 4 | 605 | 214.26 | 599 | 214.14 | 499 | 212.13 | 355 | 191.18 |
| 5 | 605 | 214.27 | 600 | 214.15 | 503 | 212.39 | 346 | 194.15 |
| 6 | 605 | 214.27 | 600 | 214.15 | 519 | 212.65 | 351 | 194.39 |
| 7 | 605 | 214.27 | 598 | 214.13 | 503 | 212.32 | 352 | 194.62 |
| 8 | 605 | 214.27 | 600 | 214.14 | 509 | 212.35 | 349 | 194.05 |
| 9 | 635 | 214.11 | - | - | - | - | 491 | 205.87 |
| 10 | 629 | 214.06 | - | - | - | - | 351 | 193.19 |

Una causa común de las bajadas de tensión es el encendido de grandes cargas en alguna fase. Al observar la Tabla 5-4, se ve claramente como el número de veces que ocurre una subtensión disminuye cuando aumenta el nivel de desequilibrio de cargas, lo cual puede ser contradictorio a priori. Esto se debe a las características en que se ha modelado dicho desequilibrio y es que, a pesar de que hay menos subtensiones, estas se desplazan fuertemente hacia la fase que demande más flujo de potencia. Paralelamente, puede verse que el nivel de tensión promedio que tienen estas subtensiones disminuye significativamente conforme aumenta el desequilibrio de cargas.

Al igual que los niveles promedio de tensión varían muy poco entre cada caso, sobre todo al calcularlos con las T_{F-N}, a las subtensiones les ocurre lo mismo.

A medida que aumenta el desequilibrio, puede verse una mejoría respecto a los casos 1 y 2 en el número de veces que ocurre una subtensión en las topologías con PT, casos del 3 a 8. Con respecto a estos casos, puede apreciarse un empeoramiento en la configuración mallada, casos 9 y 10.

Tanto en el escenario equilibrado como en el levemente desequilibrado, los niveles promedio de subtensión son prácticamente los mismos. En el escenario moderadamente desequilibrado, los niveles promedio de subtensión disminuyen alrededor del 1% si los comparamos con los escenarios anteriores. Ante escenarios de desequilibrio leve, la red presenta un comportamiento estable ante las subtensiones gracias a la presencia del elemento neutro. En cuanto al escenario fuertemente desequilibrado, las subtensiones alcanzan valores muy pequeños y puede apreciarse pequeña diferencia en función del caso de estudio. Dentro de este escenario, el caso 9 destaca por tener un nivel promedio de subtensión más estable, por el contrario, en este caso hay un mayor número de subtensiones.

Del mismo modo que los niveles promedio de tensión están ligados a las subtensiones, también lo están a la hora de determinar la máxima variación de tensión diaria, el último KPI referido a las tensiones que queda por analizar. La Figura 5-8, recopila dicho dato en un gráfico de barras para cada caso y bajo cada escenario de desequilibrio. Dichos valores han sido obtenidos teniendo con las tensiones fase-tierra.

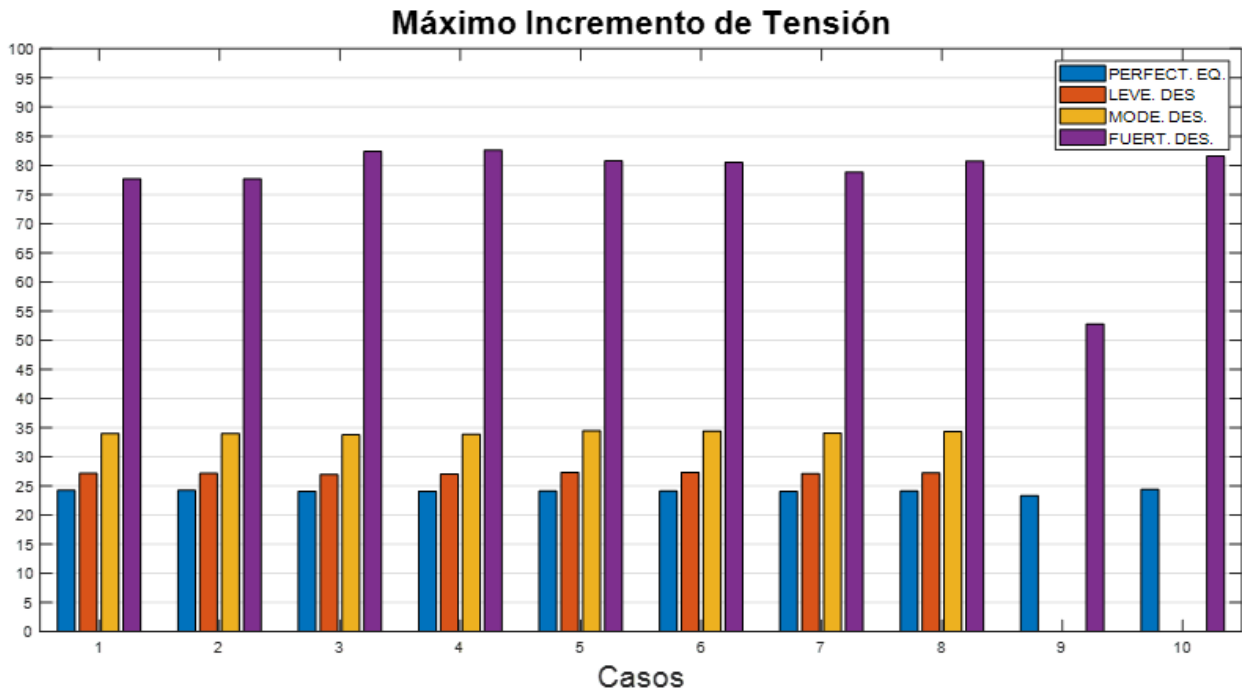


Figura 5-8. Máxima variación de Tensión diaria del feeder Comercial

La máxima variación de tensión diaria varía escasamente en cada uno de los casos y además permanece prácticamente constante en cada escenario de desequilibrio, a excepción del caso 9. En este caso, los niveles de tensión permanecen más estables a medida que aumenta el desequilibrio, tal como también se ha concluido al observar otros indicadores de tensión de la red. Al tener este caso una tensión de neutro tan pequeña, el transformador opera en rangos óptimos de trabajo, lo que disminuye los niveles de subtensión. Todo ello origina que este caso tenga unos valores de tensión máximos y mínimos más cercanos.

En el escenario fuertemente desequilibrado, si atendemos a los casos 4, 6 y 8 y los comparamos con sus respectivos análogos 3, 5 y 7, se concluye que el aumento del valor de la resistencia a tierra influye negativamente en la red, ya que este hecho desestabiliza un poco los niveles de tensión de todo el sistema cuando los desequilibrios se hacen más notorios. En los casos 9 y 10 ocurre lo mismo tanto para el escenario equilibrado como para el desequilibrado.

5.2.3. Intensidades

Se presentan a continuación los resultados de los indicadores de intensidad. Nuevamente, se recuerda que las redes de distribución de baja tensión son intrínsecamente desequilibradas, a pesar de que el escenario de consumo de cargas monofásicas sea perfectamente equilibrado, la red presenta desequilibrios de intensidad.

Al igual que ocurre con las tensiones, las intensidades aumentan de forma proporcional en cada caso de estudio, en función del escenario de desequilibrio de cargas al que esté sometida la red. De este modo, las gráficas que surgen al representar la evolución diaria de alguna magnitud referida a la intensidad, siguen el mismo patrón para cada escenario de carga. La diferencia radica en el orden de magnitud que toman dichas intensidades, siendo este orden de magnitud cada vez mayor conforme aumentan los niveles de desequilibrio de consumo de cargas.

Para comprender como es el desequilibrio de intensidad de la red, se muestra la Figura 5-9, dónde puede verse la evolución diaria del desequilibrio de intensidad del feeder Comercial en cada topología de puesta a tierra. Se ha decidido representar dicha figura para el escenario fuertemente desequilibrado, aunque las conclusiones que se obtienen tras analizarla son las mismas que para los otros tres escenarios. La gráfica mostrada a la derecha de la Figura representa lo mismo que la gráfica situada a la izquierda, simplemente se ha modificado la escala para una mejor visualización los resultados.

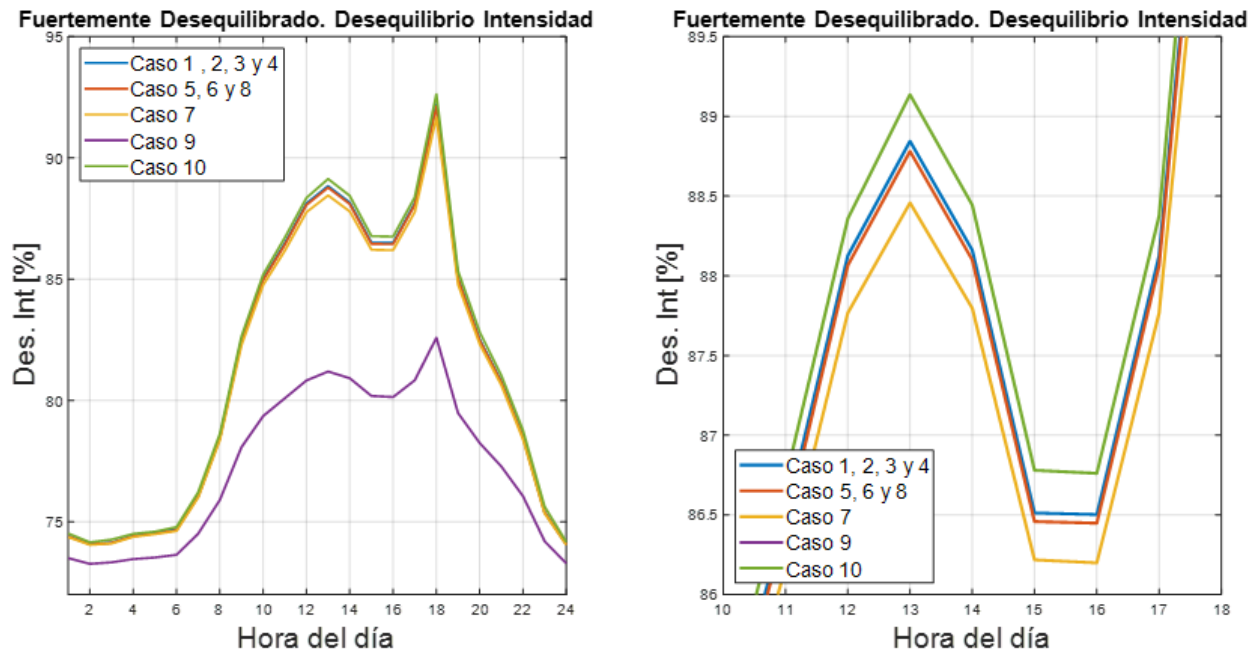


Figura 5-9. Desequilibrio de Intensidad del feeder Comercial en el escenario fuertemente desequilibrado

El desequilibrio de intensidad está muy relacionado con el desequilibrio de tensión, siguiendo una relación de proporcionalidad directa. Esta relación tiene consecuencias muy severas en el desequilibrio de intensidad, cuando este aumenta su valor, el desequilibrio de intensidad también lo hace, pero de una forma mucho más manifiesta.

Si comparamos la Figura 5-8 con la Figura 5-3, puede verse que ambos KPI's siguen el mismo patrón de comportamiento en todos los casos, a excepción de los casos 1 y 2. Si bien esta topología era la que tenía menores niveles de desequilibrio de tensión, en el caso del desequilibrio de intensidad esta configuración aumenta el desequilibrio de intensidad de tal forma que es prácticamente el mismo que los casos 3 y 4, donde hay PT en los nudos terminales.

En esta Figura 5-8 se ve claramente como el caso 9 tiene unos niveles promedio de desequilibrio de intensidad muy por debajo del resto de casos. Como ya se ha explicado, en este caso la red tiene PT en todos los nudos con un valor de resistencia nulo y, además, ambos feeder están mallados a través del neutro. Estas condiciones permiten que la red evacue con facilidad los excedentes de intensidad que se originan en las cargas desbalanceadas.

El resto de casos presentan unos niveles de desequilibrio de intensidad muy parecidos, no obstante, el caso 7 ocupa el segundo lugar. En este caso hay PT en todos los nudos con una baja resistencia, 3Ω . Este hecho le da ventaja con respecto al caso 8, donde la resistencia es de 20Ω y dificulta el paso de la intensidad a través de la PT. Es por ello que los niveles de desequilibrio de intensidad del caso 8 convergen prácticamente con los de los casos 5 y 6, donde la PT se encuentra únicamente en los nudos bifurcación. El caso 10 presenta los mayores niveles de desequilibrio de intensidad por su alta resistencia de PT, $1 \text{ k}\Omega$.

Es cierto que el desequilibrio de intensidad y el desequilibrio de tensión parecen tener un mismo patrón de comportamiento, pero sin duda alguna, las intensidades homopolares juegan un papel clave en el desequilibrio de intensidad de la red objeto de estudio. La Figura 5-10 representa como es dicha intensidad homopolar de cada caso de estudio y para el escenario de desequilibrio de cargas fuerte. Para una clara visualización de los resultados, la gráfica situada a la derecha de la figura acota los resultados de esta magnitud en el tramo horario del día más representativo. Cabe destacar que los casos 1 y 2 tienen una configuración que les imposibilita la presencia de intensidades homopolares.

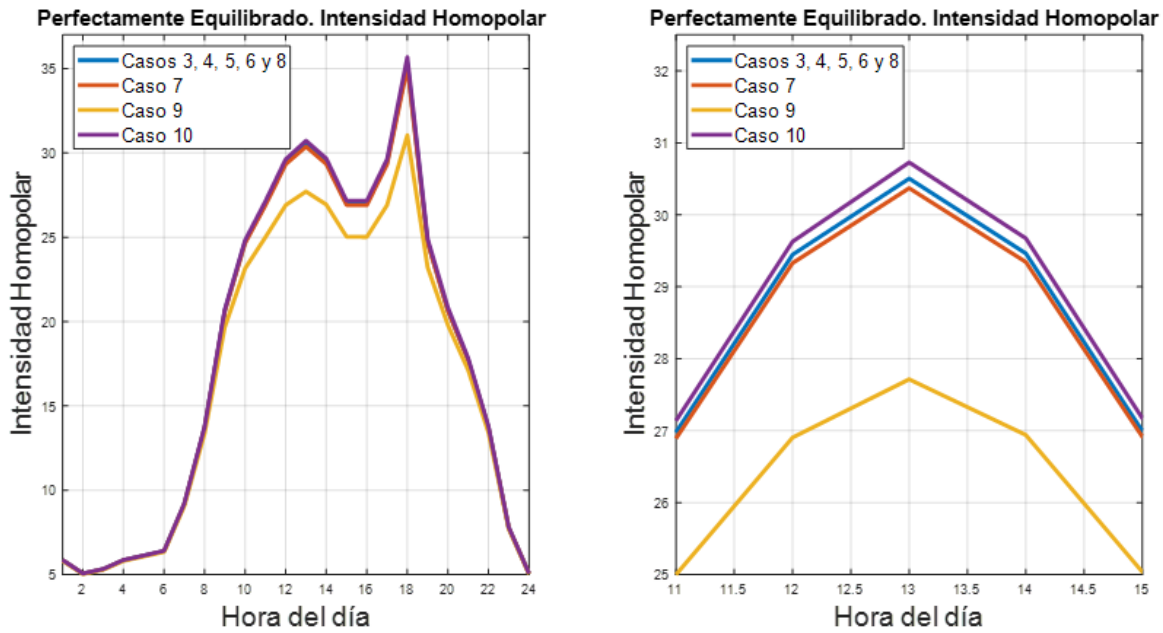


Figura 5-10. Intensidades Homopolares del feeder Comercial en el escenario de desequilibrio fuerte

Las intensidades homopolares dependes de las intensidades de PT. Las topologías con PT en los nudos hacen posible la presencia de intensidad homopolar porque cierran el circuito de PT. Un mayor número de PT disminuye las intensidades homopolares. Si aumentan las resistencias de PT, mayores son dichas intensidades, aunque esto solo es perceptible en los casos 7, 9 y 10. En los demás casos la diferencia es tan pequeña que no se aprecia. Es así como se justifican los niveles de desequilibrio de intensidad que presenta cada caso de estudio.

Las intensidades de secuencia directa e inversa, escasamente varían en cada caso, vienen determinadas por la configuración de red mallada o radial. Esto puede apreciarse en la siguiente Figura 5-11. Aunque es visible que los casos con configuración de red mallada difieren en sus intensidades. Esto es debido a la gran diferencia en el valor de la resistencia de sus PT.

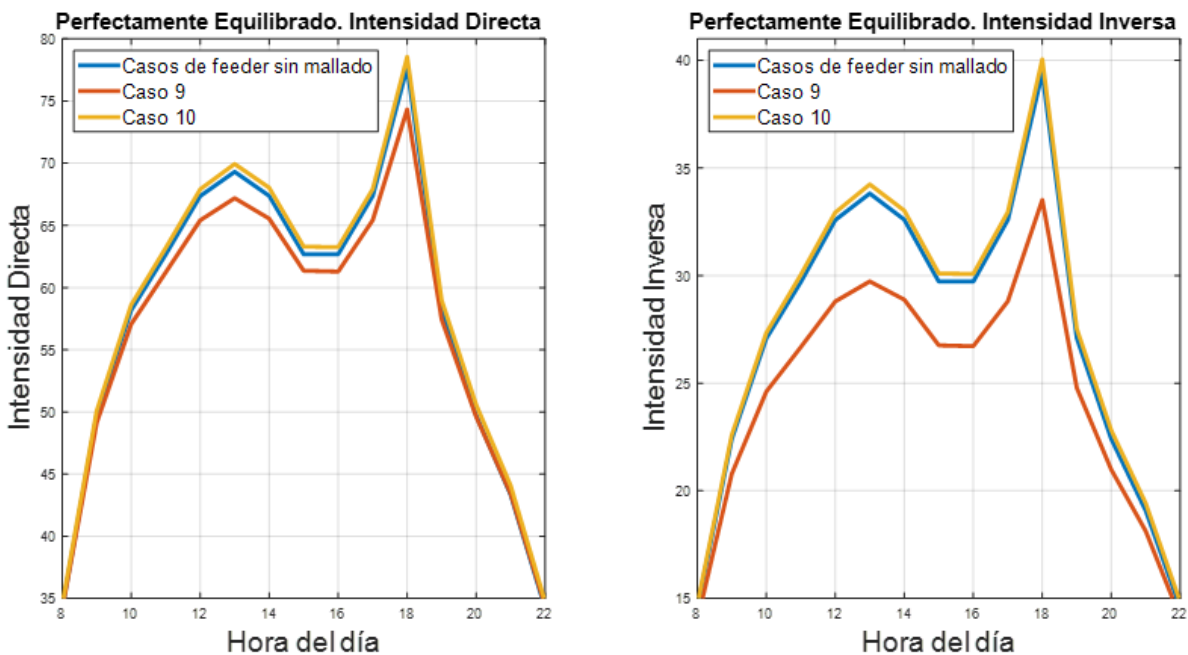


Figura 5-11. Intensidades de secuencia directa e inversa del feeder Comercial

El desequilibrio de intensidad puede traer consigo elevados valores de intensidad en el neutro. A continuación, se va a presentar en la Figura 5-12 la evolución diaria de la intensidad del neutro del escenario fuertemente desequilibrado.

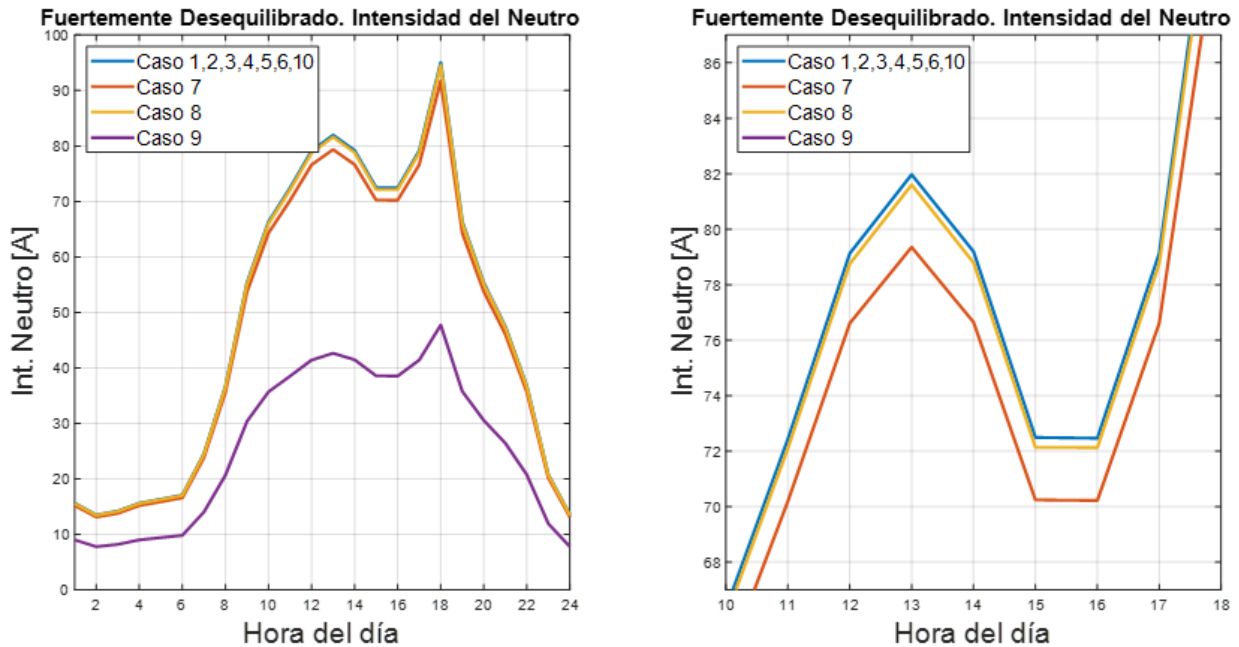


Figura 5-12. Intensidad del Neutro del feeder Comercial bajo el escenario fuertemente desequilibrado

En esta figura se ve claramente como, una vez más, el caso 9 tiene unos niveles promedio de desequilibrio de intensidad muy por debajo del resto de casos. Sus condiciones hacen posible dicha configuración viertan a tierra excedentes de intensidad.

En segundo lugar, se encuentran las topologías con PT en todos los nudos ocupan el segundo lugar. Siendo destacable el caso 7. En este caso hay PT en todos los nudos con una baja resistencia, 3Ω . Este hecho le da ventaja con respecto a su homóloga, el caso 8, donde la resistencia es de 20Ω y dificulta el paso de la intensidad a través de la PT.

La intensidad es la magnitud que se ve más afectada por los desequilibrios. Para esta magnitud, las consecuencias en el caso fuertemente desequilibrado, que la intensidad del neutro alcanza valores extremos en el resto de casos (casos del 1 al 6 y el 10), donde dicha intensidad converge entre las distintas topologías de PT. En los escenarios equilibrado, levemente desequilibrado y moderadamente desequilibrado, estos casos no convergen con tanta claridad, sino que las intensidades del neutro siguen un claro patrón de comportamiento.

Las características de este patrón son: las configuraciones sin PT son las más penalizadas, seguidas de las configuraciones con PT en nudos terminales, estas configuraciones son desfavorables que las que tienen PT únicamente en nudos bifurcación y, por último, la configuración de mallado incrementa la intensidad del neutro en escenarios equilibrados pero la disminuye en escenarios desequilibrados.

Las elevadas corrientes de neutro que se reflejan en la Figura 5-9, hacen indicar que las protecciones de la red deben activarse necesariamente, al menos en el caso desequilibrado. La Tabla 5-5 muestra el número de veces que un tipo de conductor se encuentra en condiciones de sobreintensidad. Este indicador es independiente del caso de estudio, pues varía en función del escenario de desequilibrio de cargas.

Tabla 5-5. SobreIntensidades del feeder Comercial

| Tipo de Conductor | SobreIntensidad | | |
|-------------------|--------------------------|------------------------------|----------------------------|
| | Levemente Desequilibrado | Moderadamente Desequilibrado | Fuertemente Desequilibrado |
| OH1 | 1 | 8 | 54 |
| OH2 | 0 | 0 | 23 |
| OH3 | 0 | 0 | 15 |

En el escenario perfectamente equilibrado, la red no presenta sobreintensidades en ninguna fase ni a ninguna hora del día. Con un escenario leve de desequilibrio, el conductor OH1 ya se encuentra en condiciones de sobreintensidad en una fase. Se recuerda que el conductor OH1 es el que se corresponde con la acometida principal, por lo que este tipo de escenario hace que las protecciones se disparen una vez al día, dejando sin suministro a todos los consumidores que se alimentan esa fase.

Algo semejante ocurre en el escenario de desequilibrio moderado, sin embargo, en este escenario las protecciones se disparan un total de 8 veces al día.

Si atendemos al escenario fuertemente desequilibrado, se puede concluir fácilmente que la red propuesta no es capaz de sostener este escenario en ninguno de los casos.

5.2.4. Síntesis de Resultados

En este apartado se presenta una alternativa de análisis de los resultados de simulación, pues no se representarán los KPI's en función de la hora del día. En vez de ello, se va a analizar la relación que tienen entre ellos algunos de los KPI's que se han considerado de mayor relevancia. Estos KPI's son el desequilibrio de tensión, el desequilibrio de intensidad y las intensidades y tensiones del elemento neutro.

Como ya se ha comentado en este documento, el desequilibrio de intensidad se multiplica al aumentar el desequilibrio de tensiones. En la red objeto de estudio, dichos indicadores siguen una relación que puede aproximarse como lineal, pero esta relación no es 1 a 1. Para comprender como es este tipo de relación, se dispone de la Figura 5-13, que representa el desequilibrio de intensidad en función del desequilibrio de tensión en el escenario de consumo de cargas perfectamente equilibrado.

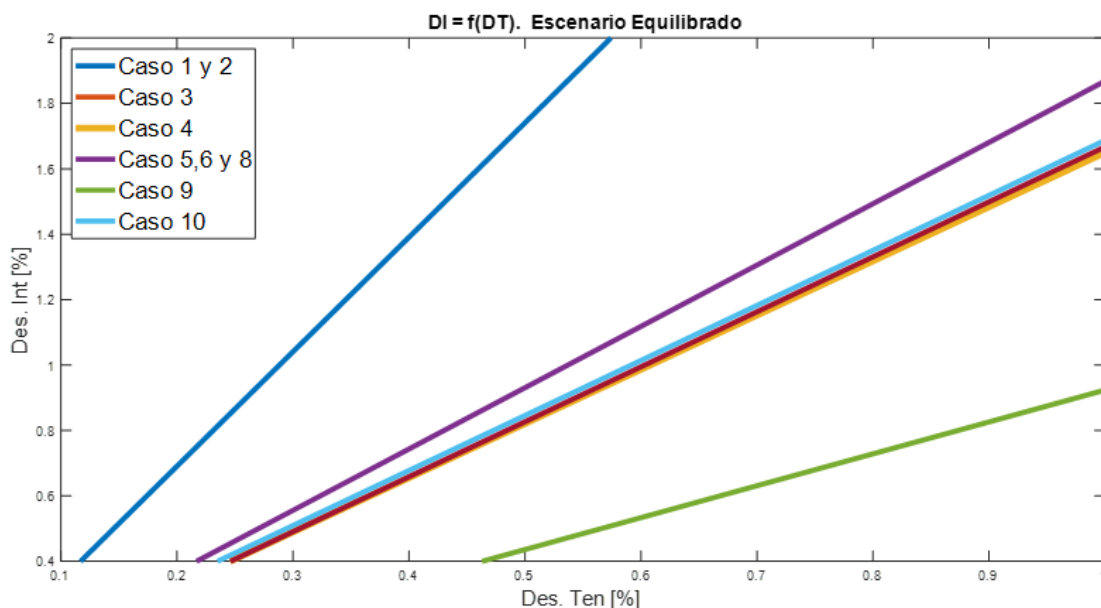


Figura 5-13. Desequilibrio de intensidad en función del desequilibrio de tensión

Cada recta representa uno o más casos de estudio, en función de si sus resultados convergen. Cuánto mayor sea la pendiente de dicha recta, el desequilibrio de intensidad del caso de estudio en cuestión dependerá en mayor medida del valor del desequilibrio de intensidad. Por el contrario, si la pendiente es menos pronunciada, la topología del caso de estudio tendrá un comportamiento de intensidades más estable al aumentar el desequilibrio de tensiones. Por tanto, la pendiente que tenga la recta afín a cada caso de estudio es un indicador de estabilidad frente al desequilibrio.

En el apartado anterior se pudo concluir que las topologías sin PT, casos 1 y 2, son el escenario más desfavorable al analizar todos los indicadores. Es cierto que estos casos presentaban un nivel de desequilibrio de tensión inferior al de los demás, pero sus altos valores de intensidad y tensión de neutro hacen que esta topología sea la menos estable cuando aumentan los niveles de desequilibrio de consumo. Por este motivo, a la hora de analizar la pendiente de las curvas que se generan al representar el desequilibrio de intensidad frente al desequilibrio de tensión, se va a tomar como referencia la pendiente de los casos 1 y 2. Hay que resaltar que los resultados del caso 1 y 2 convergen en cualquier caso.

Como cabe esperar, la pendiente de las curvas del caso 1 y 2 es mayor que en los demás casos. Esto ocurre en casa escenario de desequilibrio, bien sea leve, moderado y fuerte. Si representamos en un gráfico de barras cuál es el porcentaje en que la pendiente de un caso cualquiera disminuye en comparación con el caso 1 y 2, se obtiene la Figura 5-11.

En dicha figura, hay un gráfico a la izquierda en el que cada caso tiene asociado 3 valores: uno azul, que representa el porcentaje de reducción de pendiente con respecto a los casos 1 y 2 del escenario levemente desequilibrado (LV); otro en rojo, indicando el dicho porcentaje para el escenario moderadamente desequilibrado (MD) y, por último, otro en amarillo para el escenario fuertemente desequilibrado (FD).

A la derecha de la Figura 5-14, hay una gráfica que traza el perfil que se genera en cada escenario al unir los puntos superiores de las barras del gráfico de la izquierda.

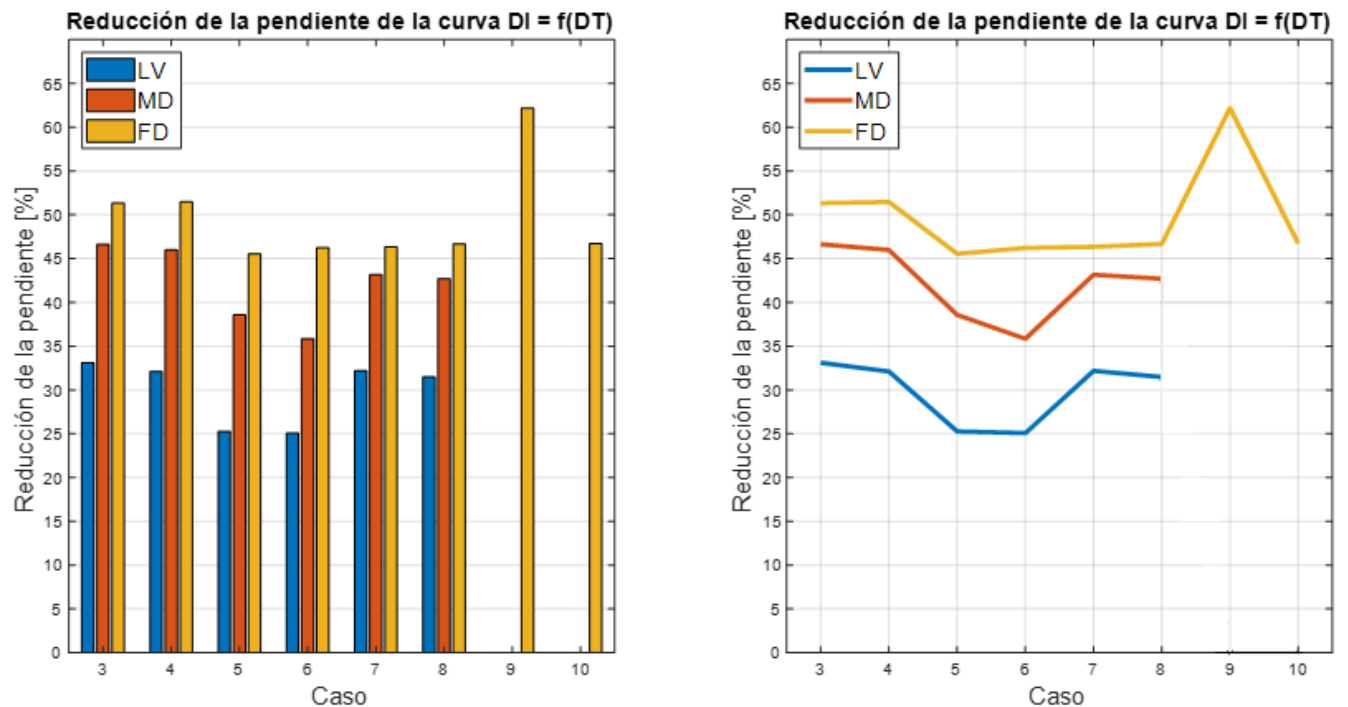


Figura 5-14. Reducción de la pendiente de la gráfica $DI = f(DT)$ de cada caso

En esta figura se aprecia claramente que el comportamiento que tiene la red es acorde al caso de estudio, puesto que, aunque el escenario de desequilibrio de cargas varíe puede concluirse que los casos 5 y 6, con PT en nudos bifurcación, presentan condiciones algo más desfavorables en comparación a los casos 3, 4, 7 y 8, pues estos

casos tienen valores muy cercanos, sobre todo para los escenarios LV y MD. En todos los escenarios, los casos 3 y 4, con PT únicamente en nudos terminales, tienen un poco más de estabilidad en el desequilibrio de intensidad cuando aumenta el desequilibrio de tensión; No obstante, la diferencia que hay entre caso con PT en todos los nudos, es muy poco significativa dentro de un mismo escenario de desequilibrio y además, dicha diferencia puede deberse a errores estadísticos

Sin duda, el caso 9 es el único caso donde la reducción de la pendiente es lo suficientemente significativa para afirmar que, en este caso, el desequilibrio de intensidad es menos manifiesta conforme aumenta el desequilibrio de tensión. Su configuración de mallado y por su bajo valor de resistencia de PT le condicionan estas características tan estables.

Ahora se hará análisis paralelo al anterior, pero para la relación que tienen las tensiones del neutro en función al desequilibrio de tensión.

Al igual que antes, a la hora de analizar la pendiente de las curvas que se generan al representar la tensión del neutro frente al desequilibrio de tensión, se va a tomar como referencia la pendiente de los casos 1 y 2, ya que son estos casos los que tenían mayores niveles de tensión de neutro en cada uno de los escenarios de desequilibrio.

La Figura 5-15 surge al representar en un gráfico de barras cuál es el porcentaje en que la pendiente de un caso cualquiera disminuye en comparación con el caso 1 y 2. Se han usado los mismos colores de leyenda que en la Figura 5-14 y se ha seguido mantenido a la derecha el perfil que genera el gráfico de barras.

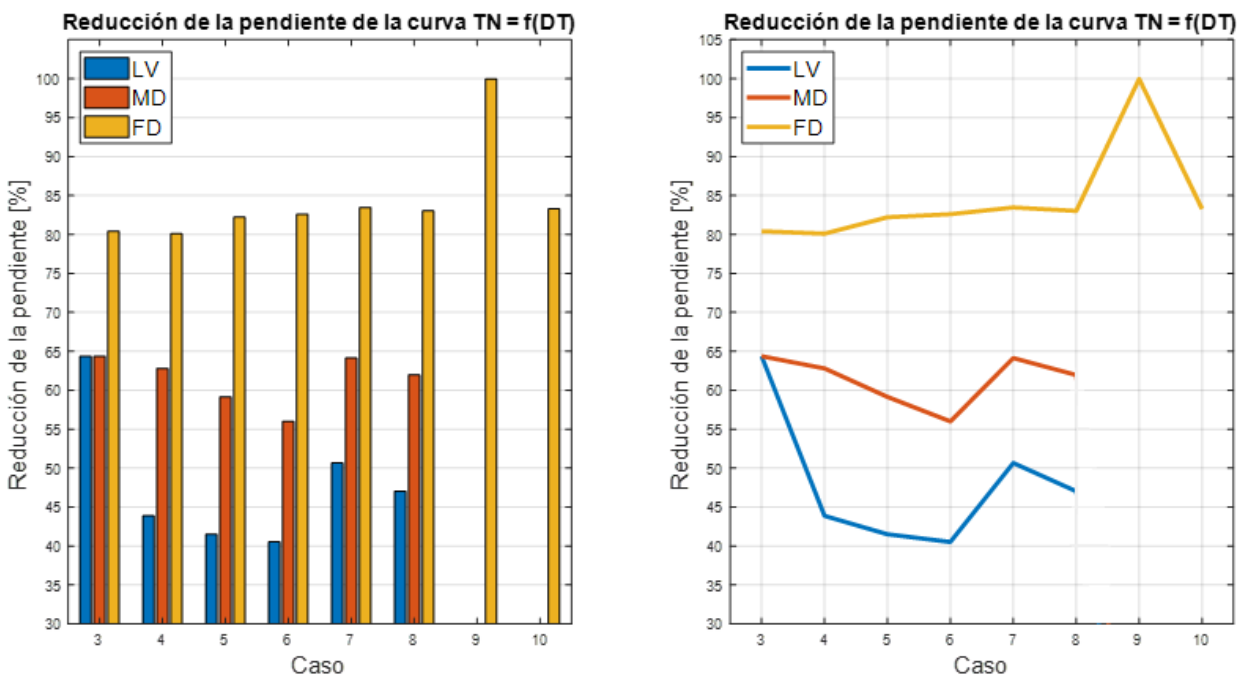


Figura 5-15. Reducción de la pendiente de la gráfica $T_N = f(DT)$ de cada caso

Al analizar la Figura 5-12 puede verse que la red tiene un comportamiento parecido al del análisis del desequilibrio de intensidad frente al desequilibrio de tensión. En los escenarios LV y MD, se ve una correlación clara y proporcional entre ellos, dónde los casos 3 y 7 presentan picos en la reducción de las tensiones del neutro. Según dicha figura, los casos 3 y 4 y los casos 7 y 8 son algo más favorables en cuanto la estabilidad de las tensiones que los casos 5 y 6, pues estos últimos son los que presentan menos niveles de mejoría que el resto de casos.

Otra conclusión que puede obtenerse de estos dos escenarios es que, al aumentar los valores de resistencia de PT, aumenta la tensión del neutro. Esto no ocurre en todos los casos del escenario FD por la influencia que tiene

el feeder Residencial, pero si nos fijamos en los casos 9 y 10, vemos como esta tendencia se cumple. De hecho, la resistencia nula de PT del caso 9 hace que las tensiones del neutro sean prácticamente nulas en todos los escenarios de desequilibrio de cargas. Además, en el escenario FD se demuestra como un aumento en el número de PT mejora a su vez las tensiones del neutro.

En último lugar, se va a llevar a cabo un análisis de la relación que tienen las intensidades del neutro con el desequilibrio de intensidades. Estos dos indicadores siguen una relación lineal en cada caso de estudio y por ello es posible analizarlos del mismo modo que se ha hecho a lo largo del desarrollo de este subapartado. Asimismo, los casos 1 y 2 son los alcanzan unos valores de intensidad de neutro mayores. De este modo, se muestra en la Figura 5-16 el porcentaje de reducción de las pendientes de cada caso, y para cada escenario de desequilibrio, con respecto a los casos 1 y 2.

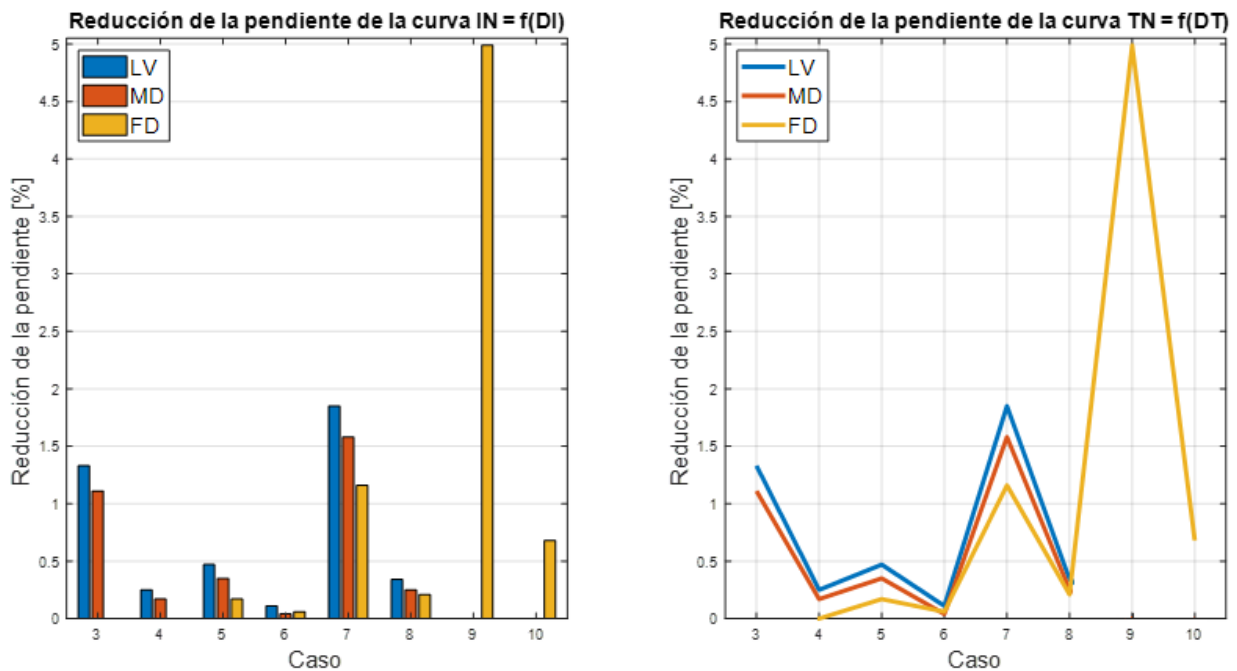


Figura 5-16. Reducción de la pendiente de la gráfica $IN = f(DI)$ de cada caso

Puede verse que en el escenario LV y MD, la red se comporta de un modo muy similar. En estos escenarios, el caso 7 destaca sobre los demás, pero en todos los casos el orden de reducción de las intensidades del neutro varía muy poco, ya que la intensidad es la magnitud que se ve más perjudicada por los desequilibrios en los consumos de cargas.

La Figura 5-13 demuestra que, de nuevo, el aumento de los valores de resistencia de PT influye negativamente en la reducción de la intensidad del neutro.

Cuando el desbalance de cargas se hace extremo, como es el caso del escenario FD, las intensidades del neutro no presentan mejoría en los casos 3 y 4. Además, en los casos 5, 6 y 8 esta mejoría es prácticamente insignificante.

De nuevo, el caso 9 es el único caso en el que la intensidad del neutro disminuye de forma relevante, de modo que es esta configuración la que presenta más estabilidad en la intensidad del neutro a medida que aumenta el desequilibrio de tensión.

Hay que destacar que la forma en que se han tratado los datos en los análisis hechos en este apartado, están sujetos al error implícito que se genera a la hora de trabajar con resultados obtenidos a partir de rectas de regresión lineales. Aun así, de los 3 análisis que se han hecho en este apartado se pueden sacar conclusiones muy similares entre ellas. Tales conclusiones son las mismas que las obtenidas en el apartado anterior.

6 CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

Una vez se han analizado los resultados de la simulación de los casos objeto de estudio, se exponen a continuación las principales conclusiones que se obtienen, así como las líneas de trabajo futuro que se generan como consecuencia de la elaboración de este proyecto.

6.1 Conclusiones

Las condiciones de operación inherentes a las redes de distribución, hacen que estas se enfrenten constantemente a la problemática de los desequilibrios. Paralelamente, la inevitable transición energética hacia las energías limpias, unida al obligado cumplimiento de un uso eficiente del sistema de suministro eléctrico en el que las pérdidas alcancen los mínimos valores posibles, traerá consigo un gran aumento en la inclusión del vehículo eléctrico, así como un desplazamiento hacia un sistema de generación cada vez más distribuida. Bajo ciertas condiciones de operación, estos factores harán que las redes de distribución incrementen sus niveles de desequilibrio de consumo de cargas entre fases.

Se ha simulado una red estándar de distribución europea bajo condiciones de desequilibrio, justificándose que esta red es incapaz de garantizar una buena calidad de suministro al estar sometida a los efectos de cargas desbalanceadas. Esto ocurre incluso si dichas cargas presentan un desequilibrio leve.

Con el objetivo de encontrar qué tipo de configuración de puesta a tierra aminora los efectos causados por los desequilibrios, se sugieren cinco diferentes topologías o sistemas de puesta a tierra. De cada topología se descomponen a su vez dos casos, uno con valores pequeños de resistencias a tierra y otro con valores algo más elevados.

Tras un análisis de los resultados obtenidos, puede apreciarse claramente que las características que tiene el caso 9 hacen que la red posea en todos los aspectos, un comportamiento más estable. Dicho comportamiento destaca sobre el resto de los casos a medida que los desequilibrios se hacen cada vez más notorios. Las peculiaridades del caso 9 en cuestión son la presencia de puestas a tierra en todos los nudos con un valor de resistencia de dicha puesta a tierra nulo y, además, existe un mallado de los feeders a través del neutro.

Las principales consecuencias que se extraen a la hora de mitigar los efectos que provocan los desequilibrios en redes de baja tensión son:

- La presencia de tomas de tierra toma un papel crucial, puesto que en los escenarios donde no las hay, la red presenta unas condiciones de inestabilidad muy superiores a las del resto de casos.
- La cantidad de puestas a tierra existentes en la red es directamente proporcional a la estabilidad con que dicha red se comporta frente a los desequilibrios.
- Las puestas a tierra únicamente en los nudos bifurcación son preferibles a que solo haya puestas a tierra en nudos de consumo, o en este caso los nudos terminales.
- Al aumentar el valor de las resistencias de las puestas a tierra, la red presenta mayores condiciones de inestabilidad.
- Las configuraciones de redes malladas presentan mayor solidez a la hora de soportar los desequilibrios que las configuraciones de redes radiales.

6.2 Trabajo Futuro

En este apartado se proponen una serie de consideraciones para futuras líneas de investigación acerca de los desequilibrios eléctricos en redes de distribución de baja tensión:

- Realizar el análisis de un mayor número de escenarios de desequilibrio y de valores de resistencia a tierra, con el fin de aumentar el volumen del muestreo de datos y garantizar aún más la certeza de los resultados obtenidos.
- Incluir el estudio de escenarios de desequilibrio leves y moderados con topologías de redes malladas.
- Analizar el comportamiento de redes desequilibradas que presenten inyección de fotovoltaica.
- Demostrar si los sistemas de almacenamiento pueden contribuir a disminuir el gran número de subtensiones que se generan en las fases con mayor consumo de las redes eléctricas desequilibradas.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Ree.es. 2021. REData - Transporte | Red Eléctrica de España. [online] Available: <https://www.ree.es/es/datos/transporte>
- [2] Rojas Zerpa, J., 2013. Planificación del suministro eléctrico en áreas rurales. [online] Tatuy-Orca-Ecologia. Available: <http://tatuy.net/web/planificacion-del-suministro-electrico-en-areas-rurales/>
- [3] Consilium.europa.eu. 2019. Pacto Verde Europeo. [online] Available: <https://www.consilium.europa.eu/es/policies/green-deal/>
- [4] Ree.es. 2021. REData - Generación | Red Eléctrica de España. [online] Available: <https://www.ree.es/es/datos/generacion>
- [5] Everis, 2021. Estudio sobre el despliegue de la infraestructura de carga del vehículo eléctrico en España. [online] p.98. Available at: https://ecodes.org/images/que-hacemos/01.Cambio_Climatico/Incidencia_politicas/Movilidad/2021_02_Estudio_sobre_el_.pdf
- [6] UNEF, 2019. El sector fotovoltaico impulsor de la transición energética. [online] p.126. Available at: https://unef.es/wp-content/uploads/dlm_uploads/2019/09/memoria_unef_2019-web.pdf
- [7] mecfi.es: empresa de instalacion industrial en barcelona. n.d. Equilibrio Trifásico. [online] Available: <https://mecfi.es/equilibrio-trifasico>
- [8] ¿Cómo funciona la Trifásica Desequilibrada? ⚡ Teorema de las Componentes Simétricas. 2020. [video] Directed by R. Lijó. https://www.youtube.com/watch?v=etv1Bv2CmTI&list=PLhZC73OYyUQt53TeO9-wN0C-lcXh7c__X&index=5&ab_channel=S%C3%ADguemelaCorriente.
- [9] Legeit Fortescue, C., 1918. Method of Symmetrical Co-Ordinates Applied to the Solution of Polyphase Networks
- [10] Ministerio de Ciencia y Tecnología, 2003. INSTALACIONES INTERIORES O RECEPTORAS ITC-BT-19. p.11.
- [11] S. Beharrysingh, “Phase unbalance on networks and its mitigation Phase unbalance on low-voltage electricity networks and its mitigation using static balancers by,” Loughborough University Institutional Repository, 2014.

[12] K. Strunz, E. Abbasi, R. Fletcher, N. Hatziaargyriou, R. Iravani, and G. Joos, *TF C6.04.02: TB 575 – Benchmark Systems for Network Integration of Renewable and Distributed Energy Resources*, 04 2014

[13] <https://www.cigre.org/>

[14] Tutorial Básico - OpenDSS. 2015. [video] Directed by P. Radatz. https://www.youtube.com/watch?v=uBYzT_qXfNU&list=PLhdRxvt3nJ8zPYT9gH8rWPLFv3pPEhEtz&index=11&ab_channel=PauloRadatz.

[15] Bender.es. 2021. Comparación entre esquemas de conexión para el suministro eléctrico -Bender. [online] Available: <https://www.bender.es/informacion-tecnica/tecnologia/sistema-it/comparacion-entre-esquemas-de-conexion-para-el-suministro-electrico>

[16] Epri.com. 2021. EPRI Home. [online] Available: <https://www.epri.com/pages/sa/openss>

[17] Ramírez Acero, J. C. (2019). Desarrollo de una aplicación en el software Open DSS orientada a la simulación de un sistema de distribución en diferentes escenarios de operación.

Available: https://ciencia.lasalle.edu.co/ing_electrica/253

[18] ENRIQUE C. QUISPE OQUENA; JULIO R. GOMEZ SARDUY., 2020. Desequilibrio de tensiones en motores de induccion. [S.l.]: PROGRAMA EDITORIAL UNIVER.

[19] Garcia Arévalo, J., n.d. Desequilibrio y pérdidas en las instalaciones eléctricas. In: Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial. Universidad de Salamanca.

