

Trabajo Fin de Máster

Máster en Ingeniería Industrial

Análisis del efecto de la rotura del conductor neutro en redes de distribución de baja tensión

Autor: Maximiliano Osuna Mérida

Tutores: Esther Romero Ramos

Álvaro Rodríguez del Nozal

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

Sevilla, 2020



Trabajo Fin de Máster
Máster en Ingeniería Eléctrica

Análisis del efecto de la rotura del conductor neutro en redes de distribución de baja tensión

Autor:

Maximiliano Osuna Mérida

Tutores:

Esther Romero Ramos

Álvaro Rodríguez del Nozal

Dpto. de Ingeniería Eléctrica
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla
Sevilla, 2020

Trabajo Fin de Máster: Análisis del efecto de la rotura del conductor neutro en redes de distribución de baja tensión

Autor: Maximiliano Osuna Mérida

Tutores: Esther Romero Ramos
Álvaro Rodríguez del Nozal

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

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2020

El Secretario del Tribunal

Agradecimientos

Como decía Ortega y Gasset, “yo soy yo y mis circunstancias”. Por tanto, no quiero desaprovechar la oportunidad para dar las gracias a aquellos que forman parte de mi vida por haber estado a lo largo del camino que culmina en esta cima.

En primer lugar, me gustaría agradecer a mis padres el haberme inculcado los valores de esfuerzo, constancia y espíritu crítico que tan importantes resultan en este gremio. Sin embargo, más les debo en otro aspecto, puesto que ellos han ido colocando con cada gesto, cada cariño y cada reprimenda, las bases para que a día de hoy sea la persona que soy. Os estaré eternamente agradecido.

A Ángela, por haber formado parte de esta maravillosa experiencia en una ciudad nueva. Mi muleta cuando las cosas no han ido del todo bien, mi compañera de fatigas; pero también mi mejor amiga, mi consejera. Sin ti, todo esto no sería lo mismo.

A mis amigos, a todos aquellos que, aún conociéndolos con anterioridad, han marcado esta etapa y con los que he compartido tantos buenos momentos. Para nosotros se quedan las vivencias que volvería a repetir indudablemente.

Y, por supuesto, a mis tutores, Álvaro y Esther, por haber estado al pie del cañón desde el primer momento, siempre dispuestos a ayudar en cuanto hiciese falta. Ha sido un placer trabajar a vuestro lado, docentes como vosotros engrandecen la profesión.

En definitiva, a todos aquellos que han formado parte de mi pasado, mi presente, y formarán parte de mi futuro. Gracias por hacerme feliz, esto también es vuestro.

Córdoba, 25 de junio de 2020

Resumen

Este documento presenta un estudio cuantitativo y cualitativo del efecto que tiene la rotura del conductor neutro en una red de distribución de baja tensión.

En primer lugar, se realiza una breve introducción con el objetivo de familiarizar al lector con los contenidos que se abordan en el trabajo. Posteriormente, se lleva a cabo una aproximación teórica al fenómeno de rotura del neutro, desde un punto de vista analítico.

A continuación, se explican los fundamentos de la herramienta matemática, programada en MATLAB, que se utilizará para analizar redes complejas. Se realizan las modificaciones oportunas de la formulación para adaptarla a la rotura del neutro en la instalación de la distribuidora, validando el nuevo modelo con diversas herramientas, entre ellas un software que resuelve flujos de potencia para redes trifásicas a cuatro hilos. Hechas las modificaciones del programa, se analizan diversos escenarios obtenidos gracias a la parametrización del sistema.

Por otra parte, también se estudia el fenómeno de la rotura del neutro en la instalación del cliente. Es necesario de nuevo modificar el algoritmo; para ello, se realiza un modelo equivalente y se implementa de nuevo en la herramienta. Una vez validado, se vuelven a ensayar los mismos escenarios de antaño con el objetivo de poder comparar y analizar ambos tipos de rotura del neutro.

Por último, se comentan en líneas generales las conclusiones que se han obtenido para cada tipo de rotura de neutro.

Abstract

This document presents a quantitative and qualitative study of the effects that a broken neutral has in a low voltage distribution network.

Firstly, a brief introduction is made in order to familiarize the reader with the contents that are addressed in the work. Then, a theoretical approach to the phenomenon of neutral breakdown is carried out, from an analytical point of view.

Next, the foundations of the mathematical tool (programmed in MATLAB) that will be used to analyze complex networks are explained. The appropriate modifications to the formulation are made to adapt it to the breakage of the neutral in the distributor company installation, validating the new model with various tools, including software that resolves power flows for three-phase four-wire networks. Made the program modifications, various scenarios obtained due to the system parameterization are analyzed.

On the other hand, the phenomenon of neutral breakage in the customer's installation is also studied. It is necessary to modify the algorithm again; to do this, an equivalent model is made and implemented again in the tool. Once validated, the same scenarios that were set before are tested in order to be able to compare and analyze both types of neutral breakage.

Finally, the conclusions that have been obtained for each type of neutral breakage are discussed in general lines.

Índice

Agradecimientos	vii
Resumen	ix
Abstract	xi
Índice	xiii
Índice de Tablas	xv
Índice de Figuras	xvii
1 Introducción	1
2 Objetivos y metodología	3
3 Caracterización analítica de la rotura de neutro	5
3.1 <i>Tensiones y cargas equilibradas</i>	5
3.2 <i>Tensiones equilibradas y cargas desequilibradas</i>	6
3.2.1 Situación común y de normalidad	7
3.2.2 Rotura del neutro	8
3.3 <i>Tensiones equilibradas y cargas desequilibradas con una carga a circuito abierto</i>	9
3.4 <i>Existencia de puesta a tierra de las cargas, neutro roto</i>	11
3.5 <i>Tensiones equilibradas y cargas desequilibradas con dos cargas a circuito abierto</i>	16
4 Implementación del modelo de rotura de neutro de la red	19
4.1 <i>Flujo de cargas en sistemas a cuatro hilos</i>	19
4.1.1 Modelo eléctrico de la rotura de neutro en red de la distribuidora	21
4.2 <i>Múltiples soluciones</i>	25
4.3 <i>Estudio de la influencia de los valores de puesta a tierra</i>	29
4.3.1 Línea sin acoplamientos entre fases	29
4.3.2 Línea con acoplamientos entre fases	31
5 Análisis de resultados: rotura en el neutro de la red	33
5.1 <i>Red con cargas en paralelo</i>	33
5.1.1 Nivel de desequilibrio sobre la carga afectada	33
5.1.2 Límites admisibles de desequilibrio de las cargas	38
5.1.3 Límites admisibles de resistencias de puesta a tierra	39
5.1.4 Influencia de la rotura sobre cargas adyacentes	40
5.2 <i>Red residencial CIGRE</i>	44
5.2.1 Desequilibrios de tensión en las cargas	44
5.2.2 Desequilibrios de tensión en las cargas adyacentes	53
6 Implementación del modelo de rotura de neutro del cliente	59
6.1 <i>Modelo eléctrico de la rotura de neutro en la red del cliente</i>	59
6.2 <i>Múltiples soluciones</i>	62

7	Análisis de resultados: rotura en el neutro del cliente	65
7.1	<i>Red con cargas en paralelo</i>	65
7.1.1	Nivel de desequilibrio sobre la carga afectada	65
7.1.2	Límites admisibles de desequilibrio de las cargas	69
7.1.3	Límites admisibles de resistencias de puesta a tierra	69
7.1.4	Influencia de la rotura sobre las cargas adyacentes	69
7.2	<i>Red residencial CIGRE</i>	73
7.2.1	Desequilibrios de tensión en las cargas	73
7.2.2	Influencia de la rotura sobre cargas adyacentes	78
8	Conclusiones	85
	Referencias	87
9	Anexo I	89

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Soluciones para $R_g = 0 \Omega$.	26
Tabla 2: Soluciones para $R_g = 2 \Omega$.	27
Tabla 3: Soluciones para $R_g = 40 \Omega$.	28
Tabla 4: Diferencias porcentuales de las tensiones fase-neutro para neutro roto (Caso 2). $R_g = 2 \Omega$.	37
Tabla 5: Diferencias porcentuales de las tensiones fase-neutro para neutro roto (Caso 2). $R_g = 40 \Omega$.	37
Tabla 6: Diferencias porcentuales de las tensiones fase-neutro para neutro roto (Caso 4). $R_g = 2 \Omega$.	38
Tabla 7: Diferencias porcentuales de las tensiones fase-neutro para neutro roto (Caso 4). $R_g = 40 \Omega$.	38
Tabla 8: Desequilibrios máximos admisibles para cumplir con la normativa.	38
Tabla 9: Cargas en los nodos de la subred residencial CIGRE.	45
Tabla 10: Equivalencia buses MATLAB-CIGRE.	45
Tabla 11: Equivalencia ramas MATLAB-CIGRE.	46
Tabla 12: Soluciones para rotura de neutro en el lado del cliente.	63
Tabla 13: Diferencias porcentuales de las tensiones fase-neutro para neutro roto (Caso 2).	68
Tabla 14: Diferencias porcentuales de las tensiones fase-neutro para neutro roto (Caso 4).	68
Tabla 15: Desequilibrios máximos admisibles para la normativa vigente.	69
Tabla 16: Matriz primitiva de impedancias para conductor aluminio/cobre.	89
Tabla 17: Matriz primitiva de impedancias para conductores subterráneos de la red CIGRE.	89

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Esquema eléctrico simplificado de un sistema de cargas equilibradas.	5
Figura 2: Esquema eléctrico equivalente por fase.	6
Figura 3: Esquema eléctrico con neutro. Cargas desequilibradas.	7
Figura 4: Esquema eléctrico con rotura de neutro. Cargas desequilibradas.	8
Figura 5: Rotura del neutro y carga a circuito abierto.	9
Figura 6: Representación fasorial de $UNcNG$.	10
Figura 7: Representación fasorial de Uc .	10
Figura 8: Representación fasorial de Ub .	11
Figura 9: Representación fasorial de Ua .	11
Figura 10: Esquema eléctrico con puesta a tierra en generador y cargas.	12
Figura 11: Esquema eléctrico con puesta a tierra en generador y cargas. Una carga a circuito abierto.	12
Figura 12: Representación fasorial de Uc .	14
Figura 13: Representación fasorial de Ua .	15
Figura 14: Representación fasorial de Ub .	15
Figura 15: Esquema eléctrico con puesta a tierra en generador y cargas. Dos cargas a circuito abierto.	16
Figura 16: Representación fasorial de Ub .	17
Figura 17: Representación fasorial de Uc .	17
Figura 18: Diagrama de flujo del programa base [4].	20
Figura 19: Modelo de línea para nudos i-j.	21
Figura 20: Modelo de línea con rotura de neutro para nudos i-j.	22
Figura 21: Modelo de línea con rotura de neutro para nudos i-j. Puesta a tierra.	22
Figura 22: Diagrama de flujo del programa modificado para rotura de neutro en la red.	24
Figura 23: Red generador-carga sin tramo de línea.	25
Figura 24: $I\Sigma$ para $R_g = 0 \Omega$.	26
Figura 25: $I\Sigma$ para $R_g = 2 \Omega$.	27
Figura 26: $I\Sigma$ para $R_g = 40 \Omega$.	28
Figura 27: Comparativa expresión analítica simplificada y expresión numérica de la tensión neutro-tierra.	30
Figura 28: Comparativa expresión analítica completa y expresión numérica de la tensión neutro-tierra.	31
Figura 29: Red formada por dos cargas en paralelo, con un tramo común.	33
Figura 30: Tensión neutro-tierra en carga afectada para Caso 1.	34

Figura 31: Tensión neutro-tierra en carga afectada para Caso 2.	35
Figura 32: Tensión neutro-tierra en carga afectada para Caso 3.	36
Figura 33: Tensión neutro-tierra en carga afectada para Caso 4.	36
Figura 34: Perfil de tensiones fase-neutro para Caso 1.	39
Figura 35: Perfil de tensiones fase-neutro para Caso 3.	40
Figura 36: Tensión neutro-tierra en carga adyacente para Caso 1.	41
Figura 37: Tensión neutro-tierra en carga adyacente para Caso 2.	41
Figura 38: Tensión neutro-tierra en carga adyacente para Caso 3.	42
Figura 39: Tensión neutro-tierra en carga adyacente para Caso 4.	42
Figura 40: Modelo europeo de red de distribución en baja tensión CIGRE. Subred residencial.	44
Figura 41: Perfil de tensiones fase-neutro por fases (Caso 1).	47
Figura 42: Perfil de tensiones fase-neutro por fases (Caso 2).	47
Figura 43: Perfil de tensiones fase-neutro por fases (Caso 3).	48
Figura 44: Perfil de tensiones fase-neutro por fases (Caso 4).	49
Figura 45: Perfil de tensiones fase-neutro por fases (Caso 5).	49
Figura 46: Perfil de tensiones fase-neutro por fases (Caso 6).	50
Figura 47: Perfil de tensiones fase-neutro por fases (Caso 7).	51
Figura 48: Perfil de tensiones fase-neutro por fases (Caso 8).	51
Figura 49: Perfil de tensiones fase-neutro por fases (Caso 9).	52
Figura 50: Perfil de tensión neutro-tierra para Caso 1.	53
Figura 51: Perfil de tensión neutro-tierra para Caso 2.	53
Figura 52: Perfil de tensión neutro-tierra para Caso 3.	54
Figura 53: Perfil de tensión neutro-tierra para Caso 4.	54
Figura 54: Perfil de tensión neutro-tierra para Caso 5.	55
Figura 55: Perfil de tensión neutro-tierra para Caso 6.	55
Figura 56: Perfil de tensión neutro-tierra para Caso 7.	56
Figura 57: Perfil de tensión neutro-tierra para Caso 8.	56
Figura 58: Perfil de tensión neutro-tierra para Caso 9.	57
Figura 59: Rotura de neutro en el lado del cliente para un nudo genérico.	59
Figura 60: Modelo equivalente para rotura de neutro en el lado de cliente.	60
Figura 61: Diagrama de flujo del programa modificado para rotura de neutro en lado de cliente.	61
Figura 62: Red generador-carga sin puesta a tierra en la carga.	62
Figura 63: $I\Sigma$ para rotura de neutro en el lado del cliente.	63
Figura 64: Tensión neutro-tierra de la carga afectada. Caso 1.	66
Figura 65: Tensión neutro-tierra de la carga afectada. Caso 2.	66
Figura 66: Tensión neutro-tierra de la carga afectada. Caso 3.	67
Figura 67: Tensión neutro-tierra de la carga afectada. Caso 4.	67
Figura 68: Tensión neutro-tierra de la carga adyacente. Caso 1.	70
Figura 69: Tensión neutro-tierra de la carga adyacente. Caso 2.	70
Figura 70: Tensión neutro-tierra de la carga adyacente. Caso 3.	71

Figura 71: Tensión neutro-tierra de la carga adyacente. Caso 4.	71
Figura 72: Perfil de tensiones fase-neutro por fases (Caso 1).	73
Figura 73: Perfil de tensiones fase-neutro por fases (Caso 2).	74
Figura 74: Perfil de tensiones fase-neutro por fases (Caso 3).	74
Figura 75: Perfil de tensiones fase-neutro por fases (Caso 4).	75
Figura 76: Perfil de tensiones fase-neutro por fases (Caso 5).	75
Figura 77: Perfil de tensiones fase-neutro por fases (Caso 6).	76
Figura 78: Perfil de tensiones fase-neutro por fases (Caso 7).	76
Figura 79: Perfil de tensiones fase-neutro por fases (Caso 8).	77
Figura 80: Perfil de tensiones fase-neutro por fases (Caso 9).	77
Figura 81: Perfil de tensión neutro-tierra para Caso 1.	78
Figura 82: Perfil de tensión neutro-tierra para Caso 2.	79
Figura 83: Perfil de tensión neutro-tierra para Caso 3.	79
Figura 84: Perfil de tensión neutro-tierra para Caso 4.	80
Figura 85: Perfil de tensión neutro-tierra para Caso 5.	80
Figura 86: Perfil de tensión neutro-tierra para Caso 6.	81
Figura 87: Perfil de tensión neutro-tierra para Caso 7.	81
Figura 88: Perfil de tensión neutro-tierra para Caso 8.	82
Figura 89: Perfil de tensión neutro-tierra para Caso 9.	82

1 INTRODUCCIÓN

La evolución tecnológica del ser humano se ha visto drásticamente impulsada por la introducción de la energía eléctrica en muchos ámbitos: doméstico, industrial, etc. El potencial transformador que tiene esta fuente de energía ha permitido que a lo largo de los siglos XIX, XX y XXI se alcancen cotas impensables en cuanto al desarrollo tecnológico y, consecuentemente, esto ha inducido una mejora en la calidad de vida de las personas.

Sin embargo, debido a la imposibilidad de generar y almacenar la energía eléctrica directamente en los puntos de consumo, resultó necesario la instalación de grandes redes de transporte y distribución que la llevase desde las grandes zonas de generación (centrales térmicas, hidráulicas, nucleares) hasta dichos puntos donde se utilizaba.

Con el aumento de la demanda y la incursión de elementos de protección y medida, la topología de la red fue aumentando gradualmente su complejidad, siendo necesaria la subdivisión de la red en tramos, dando lugar a distintas zonas de explotación: generación, transporte y distribución. Esta última resulta crítica ya que es el último escalón previo al consumidor, por tanto, ha de verificarse que las redes de distribución se encuentran en buenas condiciones, ya que cualquier condición indeseable puede tener efectos negativos en las instalaciones de los clientes.

La incursión de las energías renovables desde hace unas décadas provoca un cambio en el paradigma de la distribución de la energía eléctrica: hasta entonces en los puntos de consumo se consideraba que solo existían cargas, mientras que la integración de dicha tecnología en la red provoca la aparición de ‘prosumidores’, es decir, agentes que actúan tanto como consumidores como generadores, según sus circunstancias. Naturalmente, esto provoca de nuevo un aumento de la complejidad de la red, siendo un reto para la correcta y segura operación de la misma.

En ciertas ocasiones, en las redes de distribución de baja tensión, siendo éstas las objeto de estudio en este trabajo, ocurre un fenómeno que provoca la inestabilidad de la red y dificulta su operación, la rotura del conductor neutro. Esto puede producirse en la propia línea de distribución o en el lado del cliente, y tiene dos grandes problemas: por un lado, es difícil localizar el punto donde se produce la rotura; por otro, induce la aparición de sobretensiones en los clientes afectados por la rotura que pueden provocar daños en los equipos eléctricos de los mismos e incluso en su instalación eléctrica.

Supóngase un sistema de cuatro hilos (tres fases y neutro) formado por un generador y una carga. Cuando se corta la continuidad del neutro, ya sea en el lado del generador o de la carga, ocurre un fenómeno denominado “neutro flotante”, debido a que se pierde la referencia de la tierra, apareciendo una tensión denominada tensión de desplazamiento del neutro. La denominación de neutro flotante proviene de que dicho potencial se encuentra variando (según las sollicitaciones de la carga) y no está fijado por la puesta a tierra.

Esta tensión de desplazamiento del neutro depende de varios factores, entre ellos el grado de desequilibrio de la carga, y puede provocar problemas en los equipos conectados a la red. Debido a la condición de neutro flotante, aparecen subtensiones o sobretensiones (dependiendo de la fase) que pueden dañar la instalación.

Así mismo, también existe un riesgo elevado de accidente, ya que, en caso de no advertir el fallo del neutro, se puede producir la manipulación del cable, que se encuentra a un potencial distinto del de tierra.

A modo de regla general, se considera correcto un valor de tensión entre neutro y tierra $< 2\text{ V}$, con un máximo de 5 V . Cualquier valor superior puede ser considerado potencialmente peligroso tanto para las cargas como para los individuos que puedan manipular el circuito. Un valor de 0 V también puede indicar una posible derivación a tierra por contacto del neutro con algún componente aterrizado.

Existen diversos factores que pueden identificarse como la causa del neutro flotante. El impacto de este fenómeno varía según la posición en la que el neutro se rompe:

En el transformador de distribución

La causa principal de la rotura del neutro en el transformador de distribución se debe a problemas en los pasatapas [1]. Debido a los gradientes de temperatura sufridos por los componentes y las posibles vibraciones mecánicas a las que se ve sometido el transformador, se puede producir un afloje de las tuercas y demás componentes de fijación del cable. Esto provoca la aparición de puntos calientes que derivan en la rotura del neutro. Una instalación deficiente o mal diseño de los componentes también son motivos principales de la rotura del neutro en el transformador.

Una mala ejecución de la puesta a tierra del neutro del transformador de distribución (alta impedancia) provoca que el camino de retorno a través de la tierra, en caso de rotura del neutro, sea de peor calidad, aumentando el desequilibrio del sistema trifásico y, con ello, la tensión de neutro.

La rotura del neutro en el transformador de distribución provocará la aparición de sobretensiones y subteniones fase-neutro.

Rotura del neutro en red de distribución subterránea

Muchas causas pueden provocar la rotura del neutro en una red subterránea, siendo éstas las más habituales en redes de baja tensión. La más importante es la corrosión del cable, que se produce normalmente debido a las condiciones ambientales (alto grado de humedad) y el deterioro producido en el aislamiento en su tendido.

La presencia de equipos domésticos que actúan como cargas no lineales provocan la aparición de armónicos en la red. En particular, resulta especialmente perjudicial el tercer armónico que generan dichas cargas. Debido a la segunda ley de Kirchhoff (la suma de las intensidades que entran y salen de un nudo debe ser iguales), se sabe que, en sistemas equilibrados, la suma de las intensidades circulantes por las fases en el neutro de la carga es cero. Consecuentemente, no existe ninguna intensidad de retorno por el conductor neutro. Esto sigue siendo cierto en caso de los armónicos, menos para aquellos que son múltiplos de tres:

$$n = 3(2k + 1) \quad \forall k = 0, 1, 2, \dots$$

Para estas condiciones, la componente de intensidad de secuencia homopolar del sistema no es nula y retorna a través del neutro alcanzando valores muy elevados, incluso superiores a las corrientes de fase. Por ejemplo, un porcentaje del 35% de tercer armónico provoca una corriente circulante por el neutro del 105% de la corriente de fase [2], pudiendo derivar en sobrecargas que induzcan la rotura del cable neutro. En el caso de que el neutro se encuentre roto, estas corrientes armónicas no poseen camino de retorno, por lo que las ondas de tensión se deforman apareciendo un tercer armónico de tensión de valor considerable [3]. Esto también hace que la calidad del suministro sea menor.

Así mismo, un valor elevado de desequilibrio de las cargas entre las distintas fases también provoca el retorno de una corriente de mayor o menor magnitud, dependiendo del grado de desequilibrio anteriormente mencionado. Esto se debe a que la suma fasorial de las corrientes ya no es nula, sino que existe cierta componente homopolar. Algunas de las causas del desequilibrio son la diferencia de carga en cada fase, el hecho de que se opere alguna fase en vacío o parámetros eléctricos distintos entre fases.

Resulta importante indicar que la rotura del neutro que se ha mencionado anteriormente puede producirse en la instalación de baja tensión tanto de la distribuidora (red de distribución en baja tensión) como en la del cliente, siendo dos fenómenos distintos.

Al igual que en el caso de la rotura en el transformador de distribución, la rotura del conductor neutro podrá provocar daños debido a sobretensiones y subteniones, pudiendo conllevar la pérdida del suministro en la zona afectada.

2 OBJETIVOS Y METODOLOGÍA

En el presente documento se pretende estudiar el efecto teórico en régimen permanente de la rotura de neutro en redes de baja tensión, distinguiendo tanto la rotura en la red de la distribuidora como en la red del cliente. En especial, se quiere incidir en la influencia que tienen diversos parámetros (desequilibrio de la carga, nivel de potencia demandada por los clientes, tipos y niveles de puesta a tierra del neutro) sobre los efectos de la rotura del neutro.

Para ello, se va a modelar el fenómeno eléctricamente para implementarlo en una herramienta de análisis de flujo específicamente diseñada para redes de baja tensión [4].

Así mismo, el flujo de cargas resultante de la ejecución del modelo implementado se ha validado con otra herramienta desarrollada en el Departamento de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de Sevilla, dentro de un proyecto de I+D+i de la convocatoria de proyectos FEDER Interconecta de 2018 (Proyecto PASTORA: Análisis Preventivo de Redes Inteligentes en Tiempo Real e Integración de Recursos Renovables (PI-1897/122/2019)).

El documento se estructurará de la siguiente manera: en el Capítulo III se realiza una aproximación teórica al fenómeno a estudiar, los capítulos IV y V están dedicados al modelado y análisis de la rotura de neutro en la red de la distribuidora, y los capítulos VI y VII al de la rotura de neutro en la red propiedad del cliente. Finalmente, el capítulo VIII describe las conclusiones más relevantes de este trabajo.

3 CARACTERIZACIÓN ANALÍTICA DE LA ROTURA DE NEUTRO

En este capítulo se quiere realizar una primera aproximación al problema de la rotura de neutro. Para ello, se va a realizar un estudio analítico en el que se pretende dilucidar el efecto que tiene la rotura del neutro sobre distintas tipologías de carga y para casos muy sencillos.

Se plantea un sistema formado por un generador trifásico equilibrado que alimenta a una carga trifásica. Generador y carga se encuentran unidos por una línea de impedancia despreciable, y la carga se encuentra modelada como una impedancia constante, como se muestra en la Figura 1. Este estudio puede parametrizarse de tal manera que, para distintos valores de desequilibrio de las cargas y nivel de carga, se pueda hallar los efectos de sobretensión y subtensión existentes en las cargas bajo distintas condiciones del estado del neutro (intacto o roto) y de la puesta a tierra de la carga. En particular, los casos a estudiar son:

- Cargas equilibradas sin conductor neutro, carga aislada.
- Cargas desequilibradas con neutro intacto, carga aislada. Rotura de neutro.
- Cargas desequilibradas con una carga a circuito abierto con neutro roto. Resulta una particularización llevando al extremo el caso anterior.
- Cargas desequilibradas con neutro roto. Puesta a tierra rígida de la carga.
- Cargas desequilibradas con dos cargas a circuito abierto con neutro roto. Puesta a tierra rígida de la carga.

Se procede a la descripción y posterior cálculo de algunas situaciones de interés para el estudio:

3.1 Tensiones y cargas equilibradas

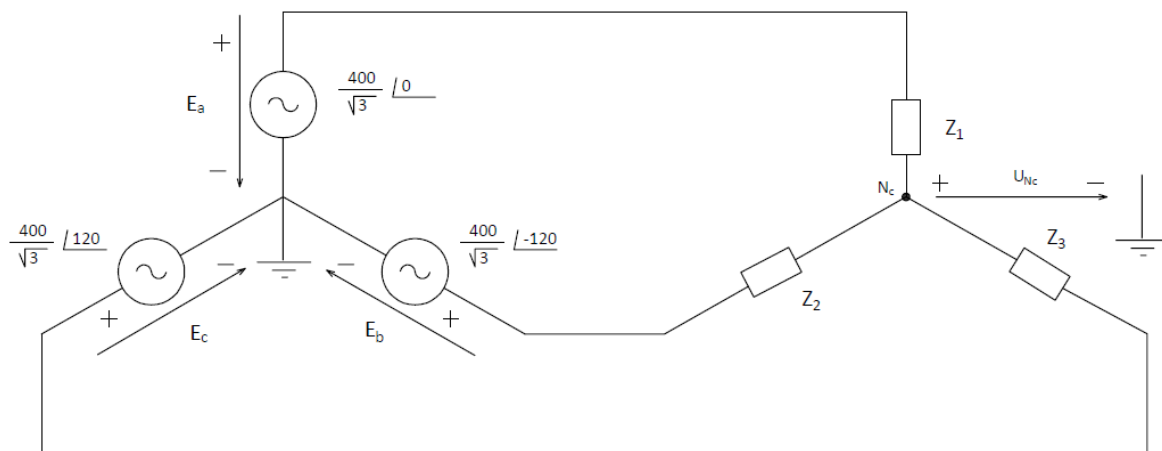


Figura 1: Esquema eléctrico simplificado de un sistema de cargas equilibradas.

El primer caso que nos concierne consiste en analizar la situación ideal: la tensión en el secundario del transformador es, como se aprecia en la figura, $\frac{400}{\sqrt{3}}$ V, cuyos fasores se encuentran desfasados en 120° geométricos. No se contempla el modelado de ninguna impedancia correspondiente al tramo de línea que une generador y carga.

Como se ha indicado, en este caso las cargas son equilibradas, es decir, $Z_1 = Z_2 = Z_3$. Esto supone que se pueda analizar el circuito de manera independiente para cada una de las fases, siendo las magnitudes del mismo valor para todas ellas.

En la Figura 2 se muestra el esquema eléctrico equivalente para cada una de las fases:

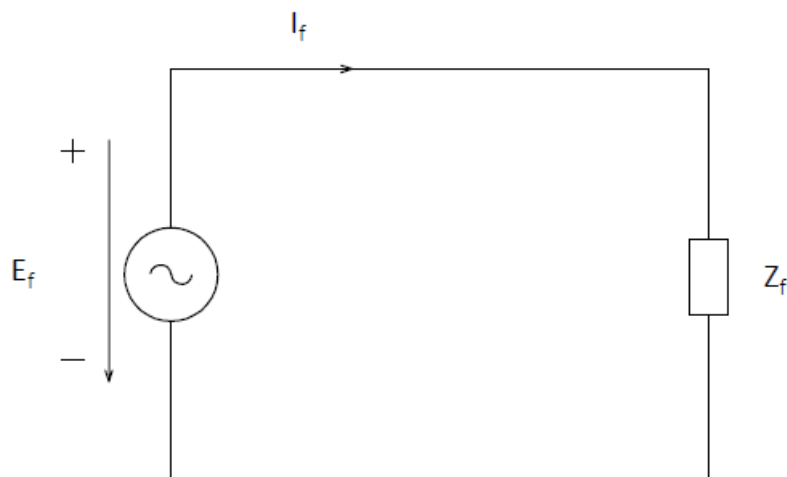


Figura 2: Esquema eléctrico equivalente por fase.

Donde se puede deducir que:

$$\begin{aligned} Z_f &= Z_1 = Z_2 = Z_3 \\ |E_f| &= |E_a| = |E_b| = |E_c| \\ |I_f| &= |I_a| = |I_b| = |I_c| \end{aligned}$$

Es decir, la intensidad I_f que recorre cada una de las fases es igual, pero desfasada en 120° para cada fase.

En este caso, se puede comprobar que la suma vectorial de las tres intensidades I_a , I_b e I_c resulta nula, es decir, no es necesario ningún camino de retorno de la intensidad. Por tanto, tanto el neutro como la puesta a tierra resultarían innecesarias en este caso.

3.2 Tensiones equilibradas y cargas desequilibradas

En este caso aparece un desequilibrio importante entre las cargas, mientras que las tensiones en el secundario del transformador permanecen equilibradas. Esto supone que sea necesario un cable de neutro que una el neutro del generador con el neutro de las cargas, despreciándose de nuevo la impedancia de este cable de neutro.

De la casuística actual se pueden derivar dos situaciones:

3.2.1 Situación común y de normalidad

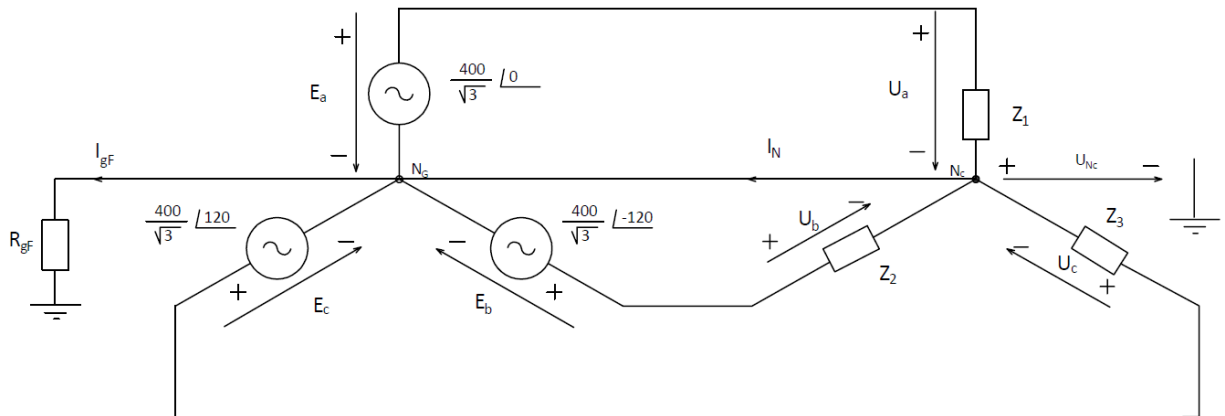


Figura 3: Esquema eléctrico con neutro. Cargas desequilibradas.

Observando la Figura 3 se aprecia la inclusión del neutro, tal y como se ha expuesto con anterioridad. También se ha realizado la puesta a tierra del generador a través de una resistencia de puesta a tierra R_{gF} . Aunque las cargas sean desequilibradas, se siguen manteniendo las siguientes igualdades:

$$U_a = E_a$$

$$U_b = E_b$$

$$U_c = E_c$$

Calculando las intensidades de cada fase:

$$I_a = \frac{E_a}{Z_1}$$

$$I_b = \frac{E_b}{Z_2}$$

$$I_c = \frac{E_c}{Z_3}$$

De lo que se puede deducir, al variar la impedancia en cada fase, que la suma vectorial de las tres intensidades no será nula. Por tanto, existe una intensidad que retorna por el neutro:

$$I_N = \frac{E_a}{Z_1} + \frac{E_b}{Z_2} + \frac{E_c}{Z_3}$$

El circuito se cierra a través de este neutro, por tanto, la intensidad circulante por la puesta a tierra del generador es nula:

$$I_{gF} = 0$$

3.2.2 Rotura del neutro

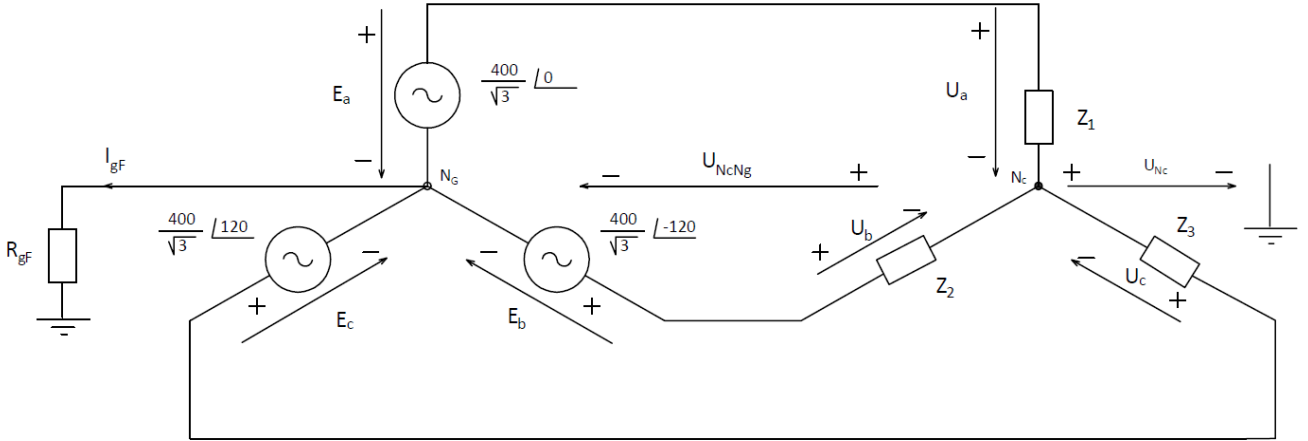


Figura 4: Esquema eléctrico con rotura de neutro. Cargas desequilibradas.

En esta situación, debido a la imposibilidad de retorno de la corriente a través del neutro, aparece una tensión entre el neutro del generador y el neutro de las cargas (tensión de desplazamiento del neutro). Calculando de manera analítica dicho valor:

$$I_a Z_1 + U_{N_c N_G} = E_a$$

$$I_b Z_2 + U_{N_c N_G} = E_b$$

$$I_c Z_3 + U_{N_c N_G} = E_c$$

Las intensidades se toman con referencias pasivas respecto a las tensiones en cada fase de la carga.

Sumando las expresiones:

$$I_a Z_1 + I_b Z_2 + I_c Z_3 + 3U_{N_c N_G} = E_a + E_b + E_c = 0$$

Se puede hallar el valor de la tensión entre neutro de generador y neutro de las cargas:

$$U_{N_c N_G} = \frac{I_a Z_1 + I_b Z_2 + I_c Z_3}{3}$$

De lo cual se puede deducir que esta tensión depende del grado de desequilibrio de las cargas. Por otra parte, también se puede concluir que la tensión $U_{N_c N_G}$ es la misma que la del neutro de las cargas, debido a la puesta a tierra del neutro del generador, donde la corriente circulante es nula.

$$I_{gF} = 0 \rightarrow U_{N_G} = 0 \rightarrow U_{N_c} = U_{N_c N_G}$$

3.3 Tensiones equilibradas y cargas desequilibradas con una carga a circuito abierto

Se trata de una particularización del caso general visto anteriormente. En este caso, una de las cargas se supone a circuito abierto, y las otras dos fases poseen el mismo valor $Z_1 = Z_2$. Esto, añadido a la rotura del neutro, provoca una situación ejemplificada en la Figura 5,

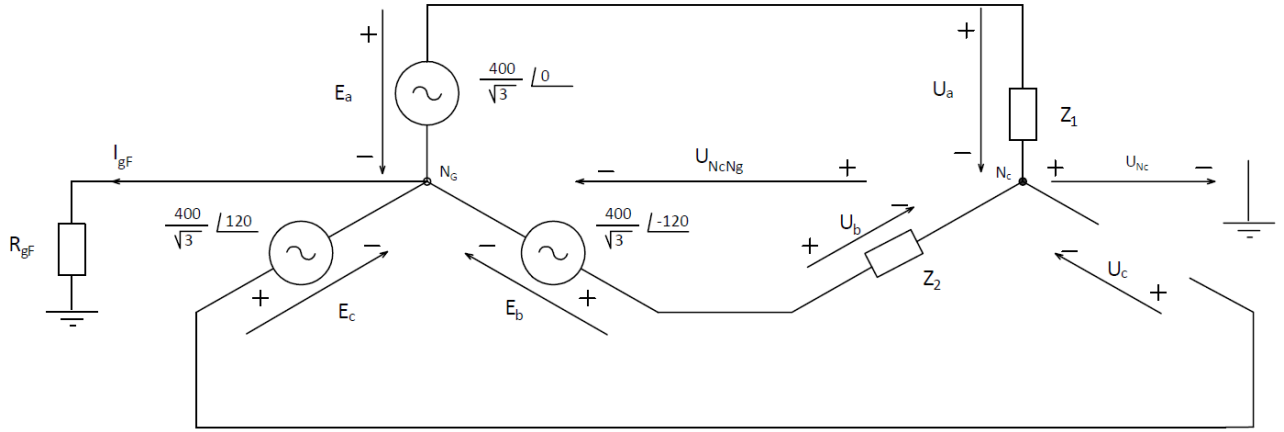


Figura 5: Rotura del neutro y carga a circuito abierto.

donde se muestra en general para este caso una R_{GF} distinta de cero al igual que en el caso anterior, si bien el valor de dicha resistencia es en general muy pequeña, prácticamente despreciable.

Al igual que en el caso general, también aparece una tensión entre neutros. De tal manera:

$$I_a Z_1 + U_{N_c N_G} = E_a$$

$$I_b Z_2 + U_{N_c N_G} = E_b$$

$$U_c + U_{N_c N_G} = E_c$$

De lo cual podemos deducir:

$$I_a = \frac{E_a - U_{N_c N_G}}{Z_1}$$

$$I_b = \frac{E_b - U_{N_c N_G}}{Z_2}$$

Como no existe corriente I_c , por la Ley de Kirchhoff:

$$I_a + I_b = 0 \rightarrow I_a = -I_b$$

Así:

$$\frac{E_a - U_{N_c N_G}}{Z_1} + \frac{E_b - U_{N_c N_G}}{Z_2} = 0$$

$$E_a - U_{N_c N_G} + E_b - U_{N_c N_G} = 0$$

$$U_{N_c N_G} = \frac{E_a + E_b}{2} \rightarrow U_c = E_c - U_{N_c N_G} = E_c - \frac{E_a + E_b}{2}$$

Debido al trabajo con fasores, se pueden representar gráficamente los valores obtenidos para $U_{N_c N_G}$ y U_c , U_b , U_a (Figura 6, Figura 7, Figura 8 y Figura 9):

$$E = \frac{400}{\sqrt{3}}$$

$$U_{N_c N_G} = \frac{E_a + E_b}{2} = \frac{E}{2} \angle 0^\circ + \frac{E}{2} \angle -120^\circ = \frac{E}{2} \angle -60^\circ$$

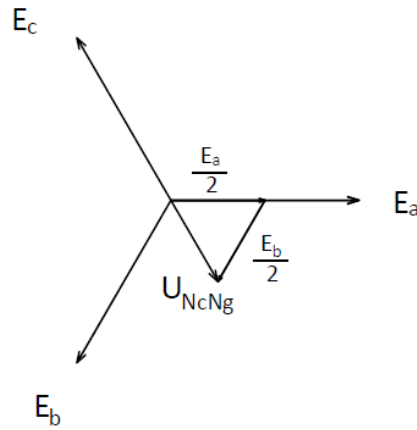


Figura 6: Representación fasorial de $U_{N_c N_G}$.

De la expresión anterior:

$$U_c = E_c - U_{N_c N_G} = E \angle 120^\circ - \frac{E}{2} \angle -60^\circ = \frac{3}{2} E \angle 120^\circ$$

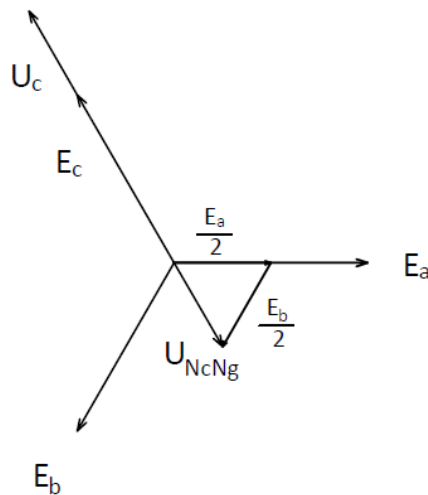
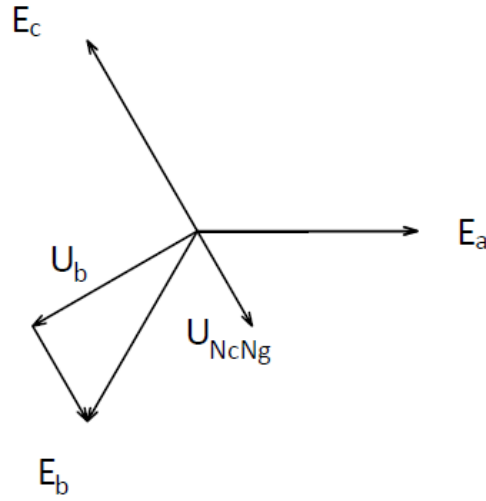


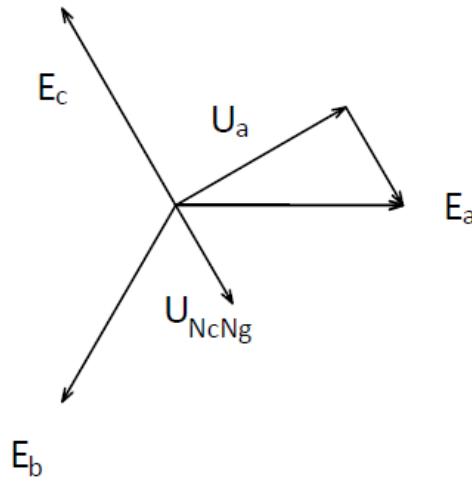
Figura 7: Representación fasorial de U_c .

Análogamente, es posible calcular los valores U_b y U_a :

$$U_b = E_b - U_{N_c N_G} = E \angle -120^\circ - \frac{E}{2} \angle -60^\circ = \frac{\sqrt{3}}{2} E \angle -150^\circ$$

Figura 8: Representación fasorial de U_b .

$$U_a = E_a - U_{N_c N_G} = E \angle 0^\circ - \frac{E}{2} \angle -60^\circ = \frac{\sqrt{3}}{2} E \angle 30^\circ$$

Figura 9: Representación fasorial de U_a .

De lo anteriormente expuesto se puede deducir que, ante una situación donde una de las cargas se encuentra a circuito abierto, se produce una situación de sobretensión del 50% en dicha fase, y una subtensión del 13,4% en las fases adyacentes que tienen la misma carga conectada.

3.4 Existencia de puesta a tierra de las cargas, neutro roto

En este caso, tal y como se puede observar en la Figura 10, existe un circuito cerrado por el que puede circular la intensidad desequilibrada. Este camino viene dado por las conexiones a tierra tanto del generador como de las cargas desequilibradas:

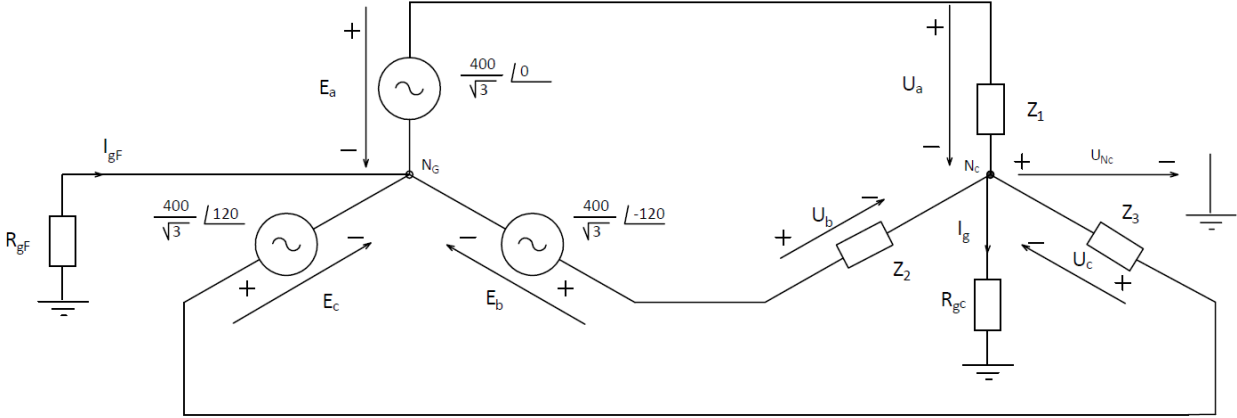


Figura 10: Esquema eléctrico con puesta a tierra en generador y cargas.

En este caso, es posible calcular la tensión entre neutro de la carga y del generador como:

$$U_{N_c N_G} = R_{gc} I_g + R_{gF} I_g$$

$$I_a + I_b + I_c = I_g = I_{gF}$$

Particularizamos para el caso anteriormente descrito (Figura 11):

Tensiones equilibradas y cargas desequilibradas con una carga a circuito abierto.

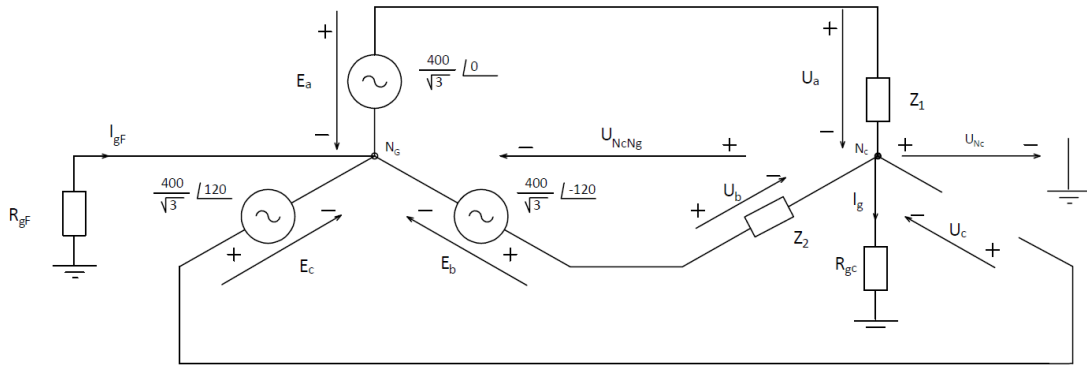


Figura 11: Esquema eléctrico con puesta a tierra en generador y cargas. Una carga a circuito abierto.

De lo cual se puede deducir la intensidad que circula a través de la puesta a tierra:

$$I_a Z_1 + R_{cg} I_g + R_{gF} I_g = E_a$$

$$I_b Z_2 + R_{cg} I_g + R_{gF} I_g = E_b$$

$$U_c + R_{cg} I_g + R_{gF} I_g = E_c$$

Así, sumando las dos primeras ecuaciones y teniendo en cuenta la hipótesis previa $Z_1 = Z_2 = Z_c$:

$$(I_a + I_b)Z_c + 2(R_{cg} + R_{gF})I_g = E_a + E_b$$

Teniendo en cuenta que:

$$I_a + I_b = I_g$$

Obtenemos:

$$I_g Z_c + 2(R_{cg} + R_{gF})I_g = E_a + E_b \rightarrow I_g = \frac{E_a + E_b}{Z_c + 2(R_{cg} + R_{gF})}$$

Suponiendo resistencias de puesta a tierra pequeñas tanto en el lado de la carga como del transformador,

$$I_g = \frac{E_a + E_b}{Z_c}$$

Procediendo a calcular cada una de las tensiones de las cargas:

$$U_c = E_c - (R_{gc} + R_{gF})I_g = E_c - (R_{gc} + R_{gF})\frac{E_a + E_b}{Z_c}$$

Volviendo a suponer buenas resistencias de puesta a tierra ($< 1\Omega$):

$$U_c = E_c - (R_{gc} + R_{gF})\frac{E_a + E_b}{Z_c} \cong E_c$$

Análogamente;

$$U_a = E_a - (R_{gc} + R_{gF})I_g = E_a - (R_{gc} + R_{gF})\frac{E_a + E_b}{Z_c} \cong E_a$$

$$U_b = E_b - (R_{gc} + R_{gF})I_g = E_b - (R_{gc} + R_{gF})\frac{E_a + E_b}{Z_c} \cong E_b$$

De lo cual se deduce que, debido a la existencia de un camino alternativo a través de la tierra, no se producen subtensiones ni sobretensiones sobre las cargas adyacentes a la carga a circuito abierto. Sin embargo, para llegar a esta conclusión, hemos tenido que considerar que la puesta a tierra ha sido buena, con valores de resistencia bajos. Normalmente esta suposición es correcta para el lado del transformador, pero no se cumple siempre en el lado de la carga.

A continuación, se va a valorar cuantitativamente un valor característico de impedancia de una carga doméstica en un bloque de viviendas medio, para tener un orden de magnitud que permita valorar cuándo es posible despreciar el valor de $(R_{gc} + R_{gF})$ frente a Z_c en las expresiones anteriormente vistas. Para ello, partimos de un caso particular, donde la carga consume 15 kW nominales de potencia a una tensión nominal de $\frac{400}{\sqrt{3}}$ V.

Partiendo de un modelo de carga de impedancia constante:

$$S_c = U_c I_c^* = U_c \frac{U_c^*}{Z_c} \rightarrow Z_c = \frac{U_n^2}{S_n} = \frac{\left(\frac{400}{\sqrt{3}}\right)^2}{15 \cdot 10^3} = 3,55 \Omega$$

En comparativa, el valor de la resistencia de puesta a tierra, debido a su ejecución, suele ser de mayor magnitud. En este caso, resulta necesario modificar la hipótesis realizada con anterioridad, despreciando el valor de la impedancia de la carga frente a la de la puesta a tierra y no al contrario, como se ha hecho:

$$I_g = \frac{E_a + E_b}{Z_c + 2(R_{cg} + R_{gF})} \cong \frac{E_a + E_b}{2(R_{cg} + R_{gF})}$$

Por tanto, el cálculo de las tensiones de las cargas se ve modificado:

$$\begin{aligned} U_c &= E_c - (R_{gc} + R_{gF}) \frac{E_a + E_b}{2(R_{cg} + R_{gF})} \cong E_c - \frac{E_a + E_b}{2} \\ U_a &= E_a - (R_{gc} + R_{gF}) \frac{E_a + E_b}{2(R_{cg} + R_{gF})} \cong E_a - \frac{E_a + E_b}{2} = \frac{E_a - E_b}{2} \\ U_b &= E_b - (R_{gc} + R_{gF}) \frac{E_a + E_b}{2(R_{cg} + R_{gF})} \cong E_b - \frac{E_a + E_b}{2} = \frac{-E_a + E_b}{2} \end{aligned}$$

Lo cual, representado fasorialmente, aparece expresado en la Figura 12, Figura 13 y Figura 14:

$$U_c = E_c - \frac{E_a + E_b}{2} = E \angle 120^\circ - \frac{E}{2} \angle -60^\circ = \frac{3}{2} E \angle 120^\circ$$

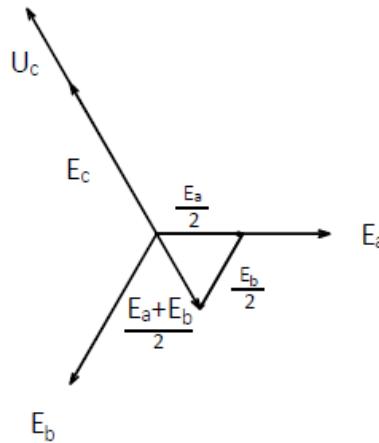
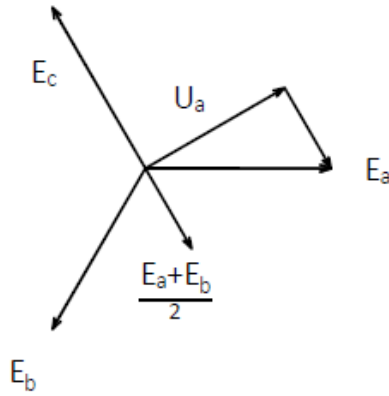
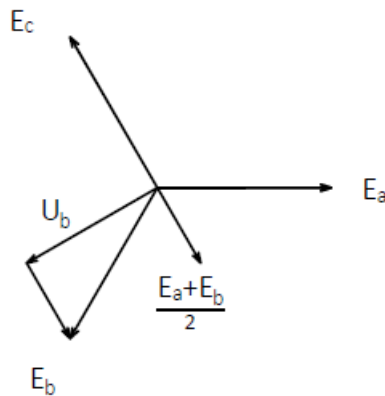


Figura 12: Representación fasorial de U_c .

$$U_a = E_a - \frac{E_a + E_b}{2} = E \angle 0^\circ - \frac{E}{2} \angle -60^\circ = \frac{\sqrt{3}}{2} E \angle 30^\circ$$

Figura 13: Representación fasorial de U_a .

$$U_b = E_b - \frac{E_a + E_b}{2} = E \angle -120^\circ - \frac{E}{2} \angle -60^\circ = \frac{\sqrt{3}}{2} E \angle -150^\circ$$

Figura 14: Representación fasorial de U_b .

A modo de conclusión, cabe resaltar que en caso de que la resistencia a tierra sea muy alta en comparación con la impedancia de la carga, se vuelve a producir un fenómeno de sobretensión del 50% en la fase a circuito abierto y dos subtensiones del 13,4% en las fases adyacentes.

Por tanto, la rotura del neutro no afecta significativamente a la tensión en las cargas bajo las siguientes circunstancias:

- Las cargas se encuentran equilibradas
- Las cargas están desequilibradas, pero la puesta a tierra de las cargas y del generador resulta despreciable frente a la impedancia de la carga

Se procede a analizar un caso aún más extremo en relación al nivel de desequilibrio de las cargas, suponiendo que dos de las fases se encuentran a circuito abierto, mientras que por una de las fases sí circula cierta intensidad.

3.5 Tensiones equilibradas y cargas desequilibradas con dos cargas a circuito abierto

En este caso, se obtiene el circuito eléctrico representado en la Figura 15:

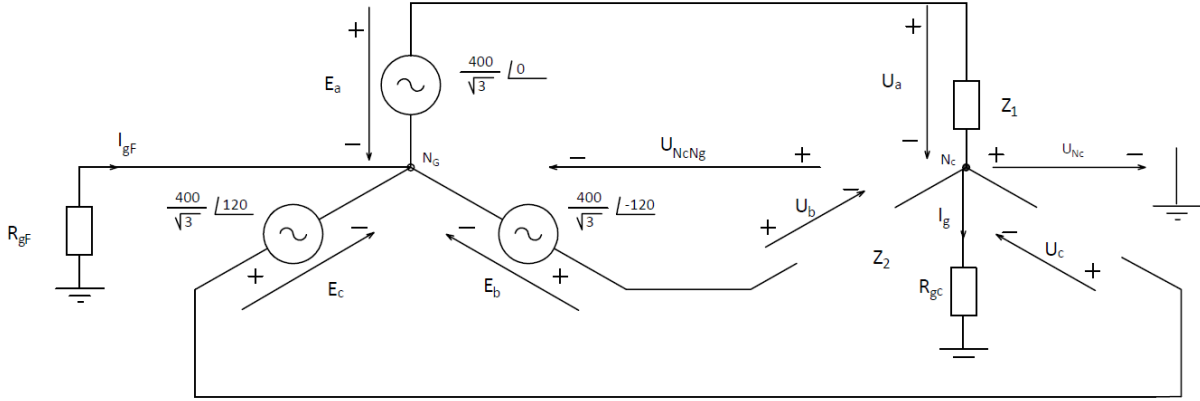


Figura 15: Esquema eléctrico con puesta a tierra en generador y cargas. Dos cargas a circuito abierto.

En este caso, solo existe una intensidad circulante por el circuito. Efectivamente:

$$I_g = I_a$$

Volviendo a formular las ecuaciones para cada fase:

$$I_a Z_1 + R_{cg} I_g + R_{gF} I_g = E_a$$

$$U_b + R_{cg} I_g + R_{gF} I_g = E_b$$

$$U_c + R_{cg} I_g + R_{gF} I_g = E_c$$

De lo que se puede deducir:

$$I_a = I_g = \frac{E_a}{Z_1 + R_{cg} + R_{gF}}$$

Por tanto, se puede volver a calcular U_b , U_c y U_a :

$$U_b = E_b - \frac{R_{cg} + R_{gF}}{Z_1 + R_{cg} + R_{gF}} E_a$$

$$U_c = E_c - \frac{R_{cg} + R_{gF}}{Z_1 + R_{cg} + R_{gF}} E_a$$

$$U_a = E_a - \frac{R_{cg} + R_{gF}}{Z_1 + R_{cg} + R_{gF}} E_a$$

Realizando de nuevo la hipótesis de que la impedancia de la carga es despreciable frente a las resistencias de puesta a tierra:

$$\begin{aligned}U_b &= E_b - E_a \\U_c &= E_c - E_a \\U_a &= E_a - E_a = 0\end{aligned}$$

Cuya representación fasorial es (Figura 16 y Figura 17):

$$U_b = E_b - E_a = E\angle -120^\circ - E\angle 0^\circ = \sqrt{3}E\angle -150^\circ$$

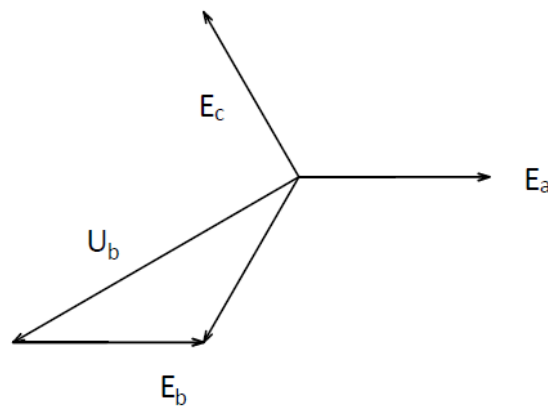


Figura 16: Representación fasorial de U_b .

$$U_b = E_c - E_a = E\angle 120^\circ - E\angle 0^\circ = \sqrt{3}E\angle 150^\circ$$

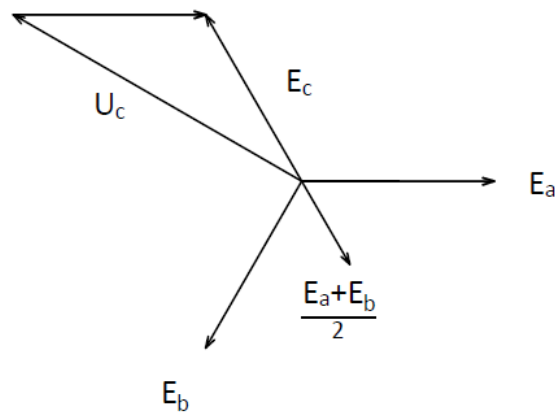


Figura 17: Representación fasorial de U_c .

En este caso extremo, se puede comprobar que la existencia de dos cargas a circuito abierto, junto con la hipótesis de una puesta a tierra deficiente desequilibra el sistema, de tal manera que en la carga que se encuentra conectada

se produce un cortocircuito y en las cargas a circuito abierto, la sobretensión es notoria, del 73,21%. También resulta interesante el grado de desplazamiento del neutro bajo dichas condiciones:

$$U_{N_C N_G} = (R_{gc} + R_{gF}) I_g \cong E_a$$

$$U_{N_C} = R_{gc} I_g \cong R_{gc} \frac{E_a}{Z_1 + R_{gc} + R_{gF}}$$

Como se comprueba, este valor puede resultar muy elevado, lo que puede ser perjudicial.

De los casos estudiados anteriormente se pueden extraer una serie de conclusiones:

- El conductor neutro es capaz de ‘absorber’ el desequilibrio de las cargas mediante la corriente de neutro, que retorna del neutro de las cargas al neutro del generador. Sin embargo, cuando este se rompe, no existe camino de retorno, produciéndose un incremento de la tensión de neutro.
- La existencia de una puesta a tierra del neutro de las cargas puede proveer de un camino alternativo para el retorno de la corriente de neutro, en caso de la rotura del conductor neutro. El valor de la resistencia de puesta a tierra influirá en el mayor o menor grado de oposición al paso de la corriente, provocando valores mayores o menores de desequilibrio de tensiones e intensidades.
- Los desequilibrios de la carga tienen un efecto negativo, se ha podido comprobar como para los casos más extremos (una carga a circuito abierto y dos cargas a circuito abierto) se obtienen desequilibrios de tensión fase-neutro de hasta el 73,21% de la tensión nominal.

4 IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO DE ROTURA DE NEUTRO DE LA RED

En el capítulo anterior se ha comprobado de manera analítica el efecto que tiene la rotura del conductor neutro para un sistema. En efecto, se produce una sobretensión en el neutro que puede provocar importantes desequilibrios con desastrosas consecuencias para la instalación. También se ha estudiado el efecto de incluir una puesta a tierra del neutro de la carga que actúe, en caso de rotura, como conductor de retorno de la intensidad desequilibrada.

Sin embargo, se trata de un caso simplificado que no representa las topologías que normalmente adoptan las redes de distribución de baja tensión, por tanto, resulta necesario estudiar modelos de mayor complejidad y dimensión.

Así, en este capítulo se pretende introducir una herramienta matemática que permita el análisis numérico de casos más complejos, con más de una carga y con distribuciones de mayor envergadura.

4.1 Flujo de cargas en sistemas a cuatro hilos

Se parte de una herramienta previa que resuelve el problema de flujo de cargas, programado en MATLAB mediante Newton-Raphson ampliado a una red de cuatro hilos [4], y que se resumen a continuación.

Dicho programa genera un modelo lineal de la red, partiendo de las ecuaciones nodales:

$$I_i = \sum_{i=1}^n Y_{BUS} \cdot U_i, \forall i = 1, 2, \dots, n$$

Por otra parte, existen una serie de restricciones no lineales, ya que en este problema no se conocen las intensidades inyectadas en los nudos, sino las potencias consumidas y/o inyectadas, dado lugar al problema no lineal. Es necesario, para resolverlo, linealizar dichas restricciones mediante series de Taylor. Una vez se linealizan las restricciones, es posible juntar ambas ecuaciones en una matriz por bloques, que representa de manera compacta el sistema a resolver,

$$\left[\begin{array}{cc|cc} -B_{ij} & G_{ij} & -1 & 0 \\ G_{ij} & B_{ij} & 0 & -1 \\ \hline I_{bi} & I_{ai} & e_i & f_i \\ I_{ai} & -I_{bi} & f_i & -e_i \end{array} \right] \cdot \left[\begin{array}{c} \Delta f_i \\ \Delta e_i \\ \Delta I_{ai} \\ \Delta I_{bi} \end{array} \right] = \left[\begin{array}{c} \Delta \alpha_i \\ \Delta \beta_i \\ \Delta P_i \\ \Delta Q_i \end{array} \right]$$

donde:

- $G_{ij} + jB_{ij}$: Elemento ij de la matriz de admitancia de nudos. Los términos forman la submatriz YBUS.
- $P_i + jQ_i$: Potencia compleja inyectada en el nudo i .
- $V_i \angle \theta_i = e_i + jf_i$: Tensión compleja en el nudo i . Estos términos forman la submatriz DV $_i$.
- $I_i \angle \varphi_i = I_{ai} + jI_{bi}$: Intensidad compleja inyectada en el nudo i . Estos términos forman la submatriz DI $_i$.
- $\Delta \alpha_i, \Delta \beta_i$: Residuos de intensidad.
- $\Delta P_i, \Delta Q_i$: Residuos de potencia.

Este problema se resuelve mediante un proceso iterativo que se basa en el cálculo de los residuos de potencia e intensidad, partiendo de un perfil básico, hasta que estos se encuentran por debajo de una tolerancia mínima. En la Figura 18 se muestra un diagrama de flujo de la rutina:

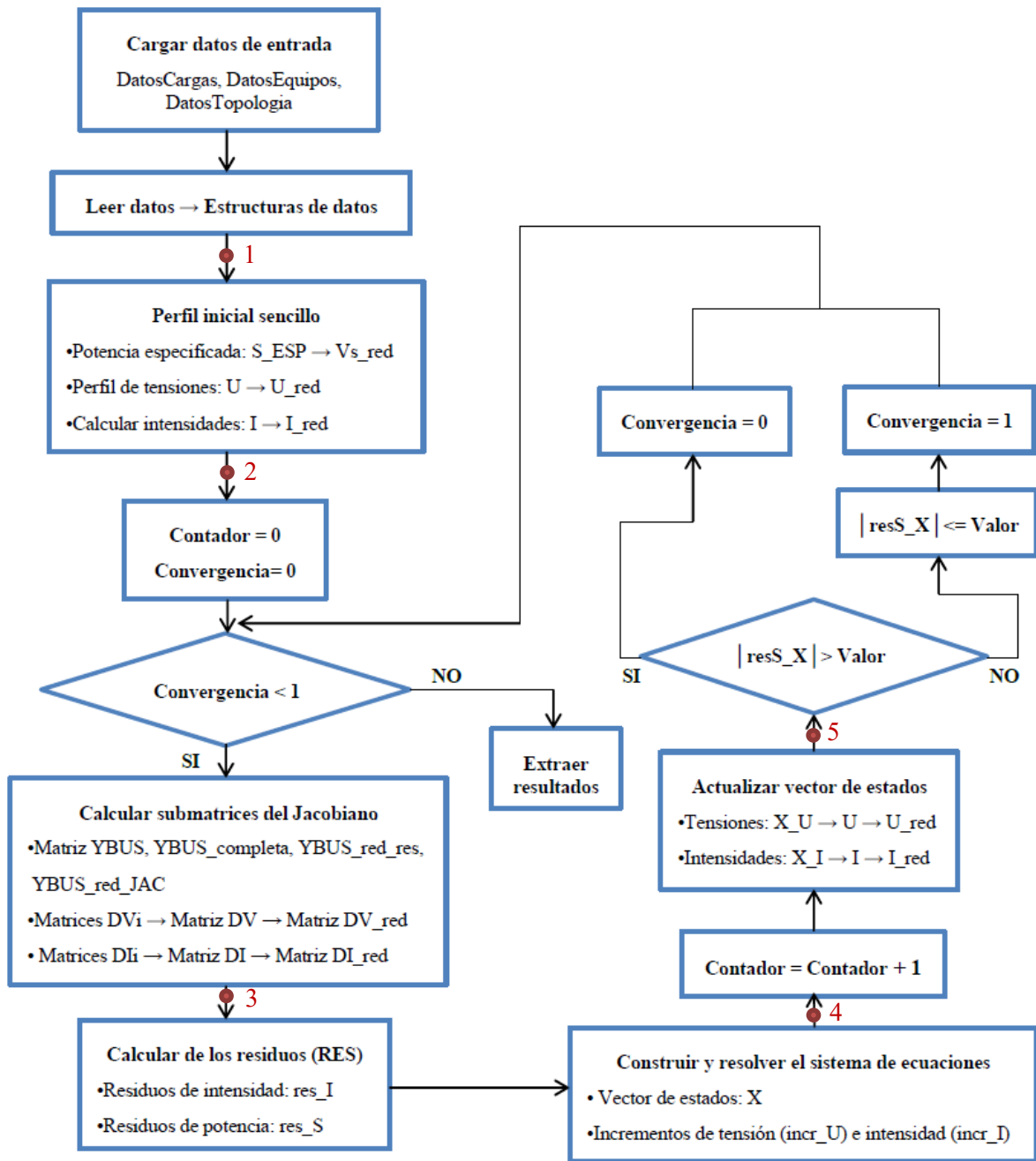


Figura 18: Diagrama de flujo del programa base [4].

A continuación, se describe paso a paso cómo funciona el algoritmo, para lo cual se distinguen los siguientes puntos:

1. Se introducen todos los datos concernientes a la red: conductores utilizados, número de nudos, ramas que unen los distintos buses, potencias consumidas/inyectadas, puestas a tierra de los nodos, etc.
2. Se inicializa el programa mediante un perfil inicial de tensión. Las intensidades se calculan en función de la potencia especificada y el perfil de tensión inicial: $I_i = \left(\frac{S_i}{U_i}\right)^*$. Se obtienen los términos $e_i + jf_i$ (tensión) y $I_{ai} + jI_{bi}$ (intensidad), con los que se forman las submatrices DV y DI.
3. Con los datos de los conductores, ramas y puestas a tierra, se obtiene la matriz de admitancias del sistema YBUS (compuesta por $G_{ij} + jB_{ij}$) la cual se trata para poder introducirla en el sistema a resolver.

4. A partir de las submatrices que conforman la matriz de coeficientes, se obtienen los vectores de residuos $\Delta\alpha_i, \Delta\beta_i$ y $\Delta P_i, \Delta Q_i$. Se resuelve el sistema, obteniendo $\Delta f_i, \Delta e_i, \Delta I_{ai}, \Delta I_{bi}$, con los que es posible actualizar el vector de estados X (que incluye las tensiones e intensidades inyectadas en cada nudo).
5. Se comprueba si los residuos de potencia $\Delta P_i, \Delta Q_i$ son menores que una tolerancia, previamente establecida. Los residuos de intensidad, al provenir de una ecuación con caracter lineal, son nulos a partir de la segunda iteración.

4.1.1 Modelo eléctrico de la rotura de neutro en red de la distribuidora

La herramienta que sirve como base para el programa utilizado está formulada para resolver el problema de flujo de cargas por una red de distribución en baja tensión, trifásica y con neutro. Es necesario realizar algunas modificaciones sobre los datos de entrada para adaptarlos a la situación que se pretende simular: la rotura del neutro de la red.

Se parte del modelo de línea entre dos nudos cualesquiera i-j (Figura 19),

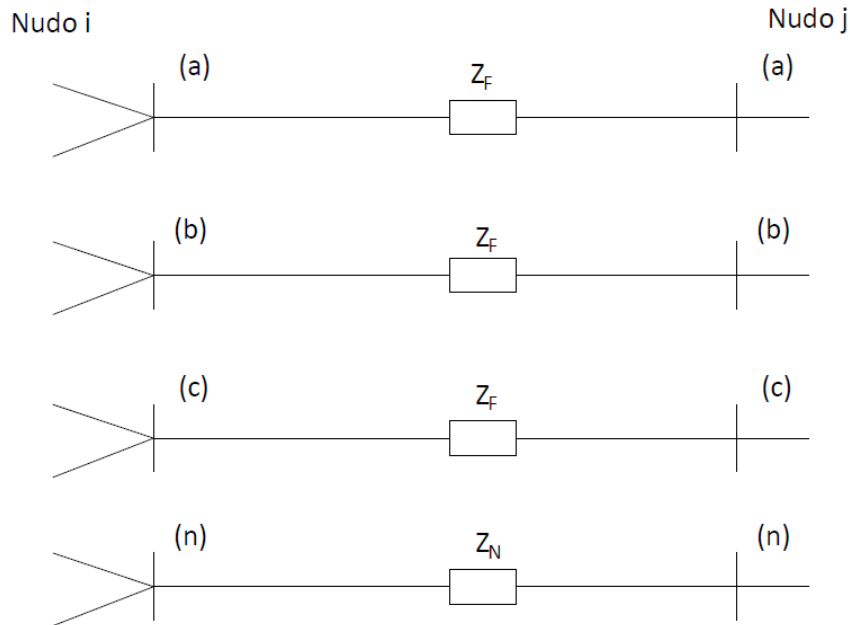


Figura 19: Modelo de línea para nudos i-j.

cuya matriz de admitancias, de dimensión 4x4, es:

$$Y = Z^{-1} = \begin{bmatrix} Y_{aa} & Y_{ab} & Y_{ac} & Y_{an} \\ Y_{ba} & Y_{bb} & Y_{bc} & Y_{bn} \\ Y_{ca} & Y_{cb} & Y_{cc} & Y_{cn} \\ Y_{na} & Y_{nb} & Y_{nc} & Y_{nn} \end{bmatrix}$$

Al producirse la rotura del neutro de la red, se pierde la continuidad del cable neutro. Esto puede verse representado en la Figura 20.

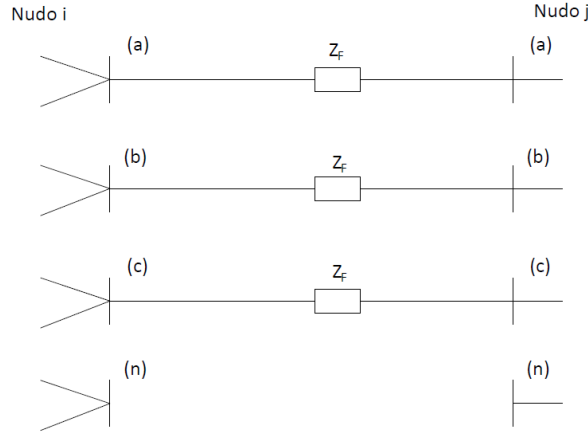


Figura 20: Modelo de línea con rotura de neutro para nudos i-j.

La matriz de admitancias se reduce, adquiriendo dimensiones 3x3, al no existir conductor neutro.

$$Y_{3 \times 3} = \begin{bmatrix} Y_{aa} & Y_{ab} & Y_{ac} \\ Y_{ba} & Y_{bb} & Y_{bc} \\ Y_{ca} & Y_{cb} & Y_{cc} \end{bmatrix}$$

Sin embargo, una muy buena aproximación al problema consiste en añadir ceros en los términos correspondientes al neutro, esto es, la última fila y última columna.

$$\begin{bmatrix} I_{ij}^a \\ I_{ij}^b \\ I_{ij}^c \\ I_{ij}^n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{aa} & Y_{ab} & Y_{ac} & 0 \\ Y_{ba} & Y_{bb} & Y_{bc} & 0 \\ Y_{ca} & Y_{cb} & Y_{cc} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_i^a - V_j^a \\ V_i^b - V_j^b \\ V_i^c - V_j^c \\ V_i^n - V_j^n \end{bmatrix}$$

Este modelo es compatible con la rotura de neutro, puesto que en todo caso la corriente $I_{ij}^n = 0$ y el término $V_i^n - V_j^n$ no influye en el resto de fases. Sin embargo, esta matriz de admitancias $Y_{4 \times 4}$ no tiene inversa. Para conseguir que dicha matriz sea invertible, se coloca una resistencia de puesta a tierra R_g de valor muy elevado en el neutro del nudo j (Figura 21); de nuevo esto es compatible con la rotura del neutro y se consigue que la matriz anterior se pueda invertir.

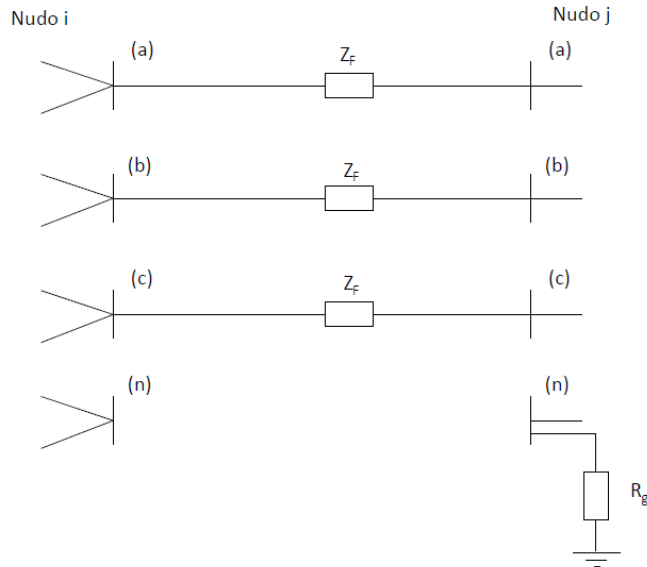


Figura 21: Modelo de línea con rotura de neutro para nudos i-j. Puesta a tierra.

Introduciendo las modificaciones mencionadas anteriormente se consigue un modelo que replica el comportamiento del sistema ante una rotura de neutro:

$$\begin{bmatrix} I_{ij}^a \\ I_{ij}^b \\ I_{ij}^c \\ I_{ij}^n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{aa} & Y_{ab} & Y_{ac} & 0 \\ Y_{ba} & Y_{bb} & Y_{bc} & 0 \\ Y_{ca} & Y_{cb} & Y_{cc} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{R_g} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_i^a - V_j^a \\ V_i^b - V_j^b \\ V_i^c - V_j^c \\ V_i^n - V_j^n \end{bmatrix}$$

Esta rama i-j puede ser cualquiera de las ramas que conformen la red del problema. Debido a ello, se pone de manifiesto la necesidad de indicar qué rama se encuentra afectada por la rotura del neutro, sobre la cual se realizarán las modificaciones oportunas. Por tanto, se ha añadido un campo de entrada de datos por parte del usuario, que debe indicar en qué rama se produce el fenómeno.

El tratamiento de la matriz de admitancias de las ramas no afectadas por la rotura no se ve modificado respecto a la programación inicial.

Se incluyen las disposiciones anteriores sobre el diagrama de flujo del programa, obteniendo el resultado visible en la Figura 22.

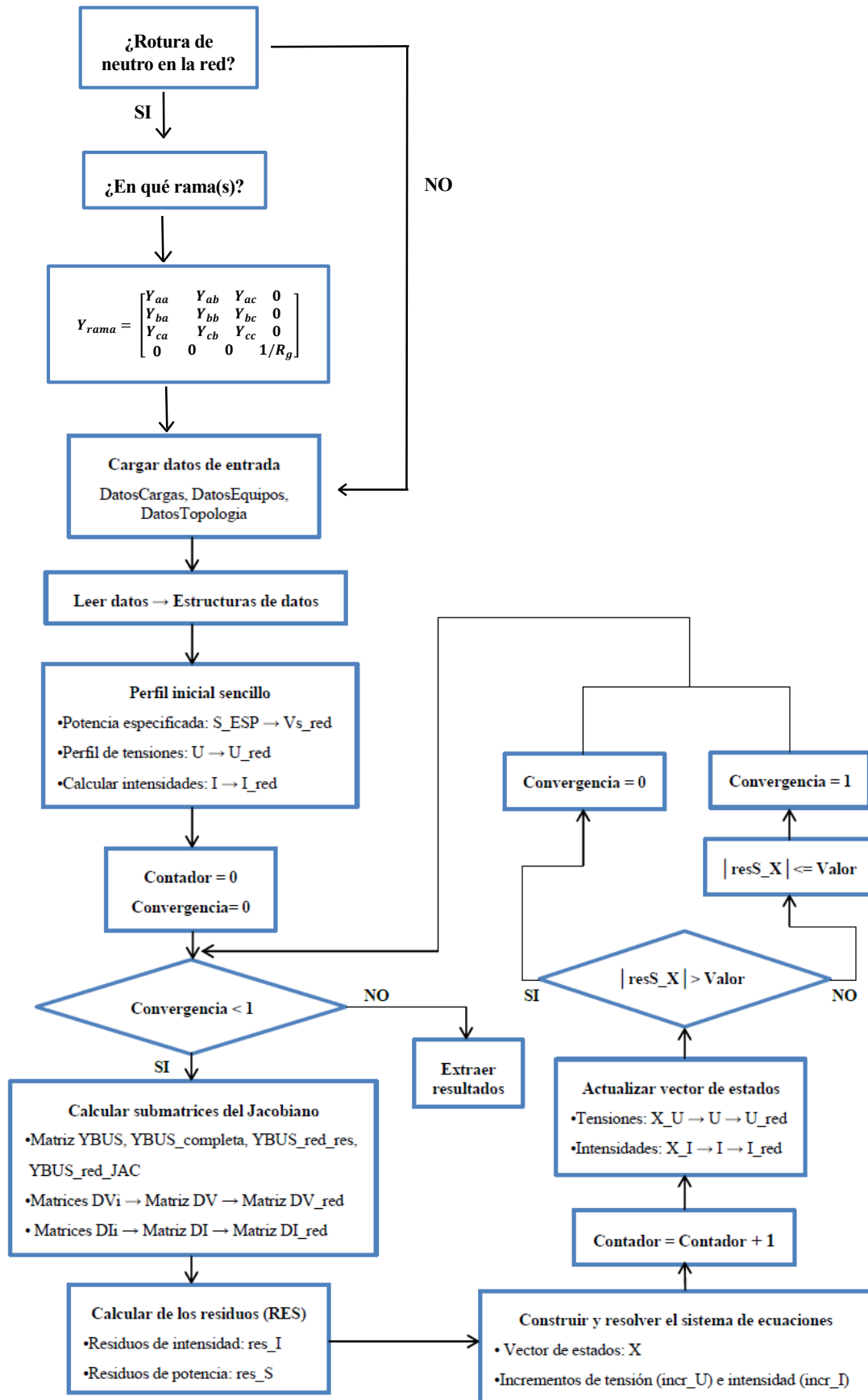


Figura 22: Diagrama de flujo del programa modificado para rotura de neutro en la red.

4.2 Múltiples soluciones

En [5] se ha investigado el proceso por el cual aparecen múltiples soluciones en los algoritmos de resolución de flujos de potencia, en el caso de que la red esté desequilibrada. En particular, se estudia una red simple formada por un generador y una carga sin conductor neutro, exponiendo las múltiples soluciones halladas en distintos escenarios. Se observa que, para distintos valores de resistencia de puesta a tierra, el número de soluciones encontradas varía.

Durante el proceso de resolución mediante el algoritmo implantado en el programa, se pone de manifiesto que, en algunas ocasiones, se halla más de una solución que cumple las restricciones impuestas. La obtención de una u otra depende de la solución inicial a partir de la cual opera el algoritmo.

Para comprobar las posibles soluciones a las que el programa converge, se analiza la red más simple, formada también en nuestro caso por un generador y una carga (Figura 23):

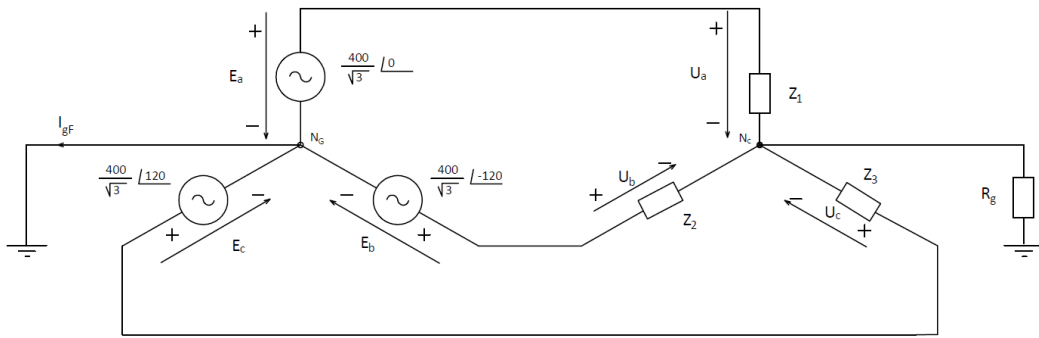


Figura 23: Red generador-carga sin tramo de línea.

La carga, de 63 kW de potencia, se reparte entre fases con un desequilibrio de carga entre fases [36,32,32] %. La ley de corrientes de Kirchhoff se puede aplicar al neutro de la carga, de tal manera que:

$$I_{\Sigma} = I_a + I_b + I_c + I_g = 0$$

Expresando la corriente en función de las potencias demandadas por cada fase:

$$I_{\Sigma} = \left(\frac{S_{an}}{U_n - U_a} \right)^* + \left(\frac{S_{bn}}{U_n - U_b} \right)^* + \left(\frac{S_{cn}}{U_n - U_c} \right)^* + \frac{U_n^1}{R_g} = 0$$

Considerando como variables las tensiones, se puede observar el carácter no lineal de la ecuación anterior, por tanto, es posible la existencia de más de una situación en la que el sistema encuentre un punto de estabilidad. En base a esto, se programará una rutina en la cual se varía el valor de la tensión neutro-tierra, tanto la parte real como la imaginaria, con un paso $p = 0,1$ V. El resto de parámetros (potencias demandadas por la carga y resistencia de puesta a tierra) se encontrarán fijos, resolviendo primeramente el problema para fijar las tensiones fase-neutro U_a , U_b y U_c . El objetivo es encontrar diferentes valores de U_n que cumplen la ecuación anterior.

Como se ha comentado anteriormente, uno de los factores que modifica el número de soluciones halladas es el valor de R_g . Por tanto, se estudiarán los tres casos habituales: la resistencia de puesta a tierra adoptará el valor $R_g = 0 \Omega$, $R_g = 2 \Omega$ y $R_g = 40 \Omega$.

En la Figura 24 se muestra la gráfica tridimensional que representa los valores de I_{Σ} para un rango de valores de

U_n , estableciendo un valor de $R_g = 0 \Omega$:

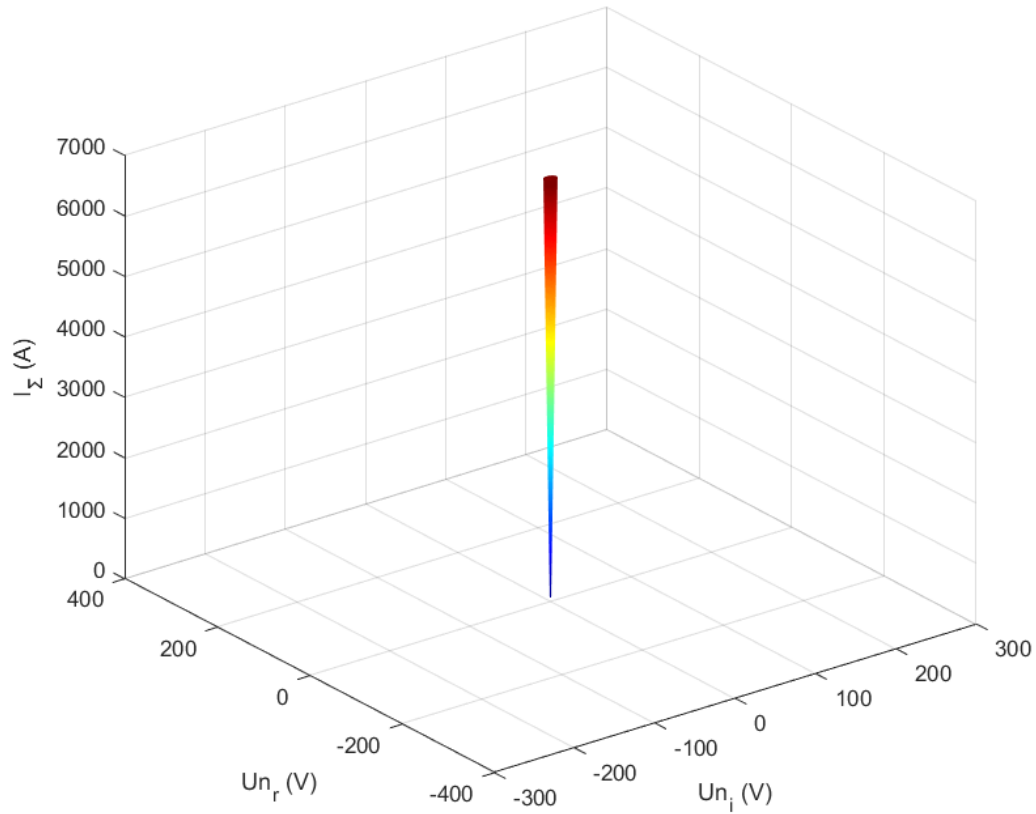


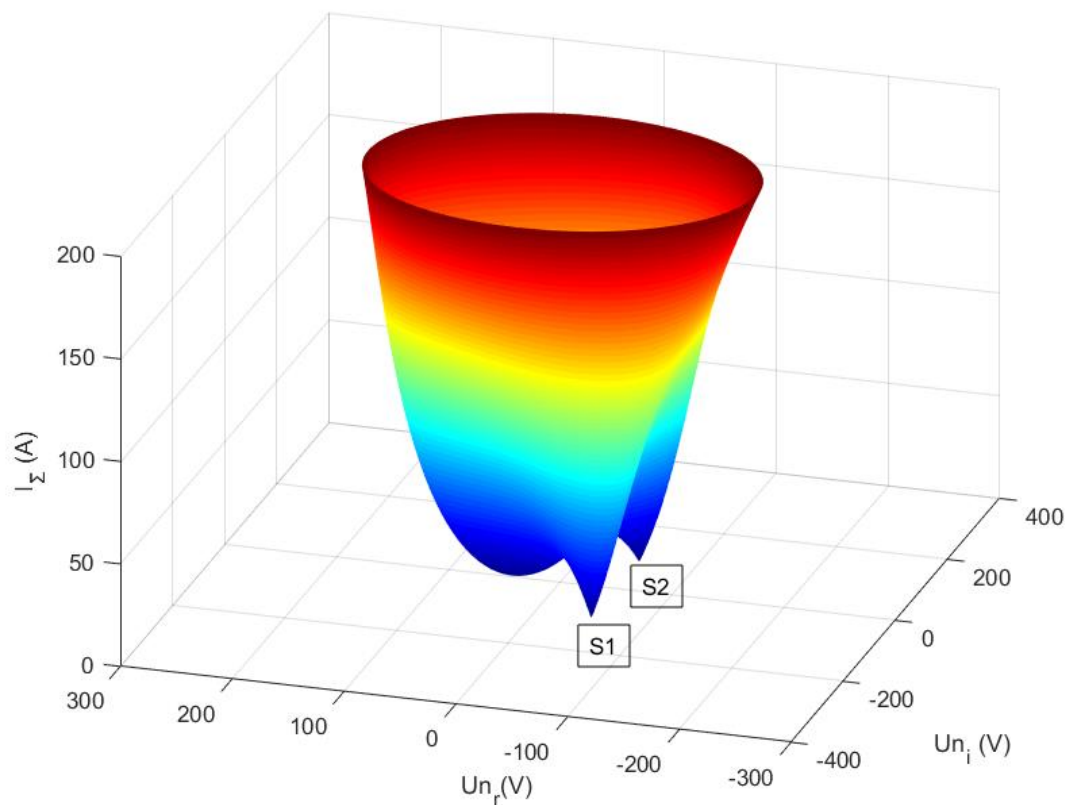
Figura 24: I_Σ para $R_g = 0 \Omega$.

Se observa una solución S1, como podemos comprobar en la Tabla 1. Comparamos dicha solución con la obtenida por la herramienta matemática:

Tabla 1: Soluciones para $R_g = 0 \Omega$.

Solución	Valor solución U_n (V)	Valor solución programa U_n (V)
S1	$0 \angle 0^\circ$	$0 \angle 0^\circ$

De manera análoga, se pueden obtener la gráfica para una $R_g = 2 \Omega$ (Figura 25):

Figura 25: I_{Σ} para $R_g = 2 \Omega$.

Se comparan las soluciones alcanzadas en la Figura 25 con las del programa, en la Tabla 2:

Tabla 2: Soluciones para $R_g = 2 \Omega$.

Solución	Valor solución U_n (V)	Valor solución programa U_n (V)
S1	$104,0487 \angle -118,2448^\circ$	$104,0797 \angle -118,2481^\circ$
S2	$104,0487 \angle 118,2448^\circ$	$104,0797 \angle 118,2481^\circ$

Las ligeras diferencias entre los valores hallados y los encontrados por el programa radica en la resolución del paso que se ha adoptado. Este puede disminuirse, pero el coste computacional es mucho mayor que la mejora en la resolución.

Finalmente, para el último caso que se ha planteado ($R_g = 40 \Omega$), se obtiene la gráfica tridimensional mostrada en la Figura 26:

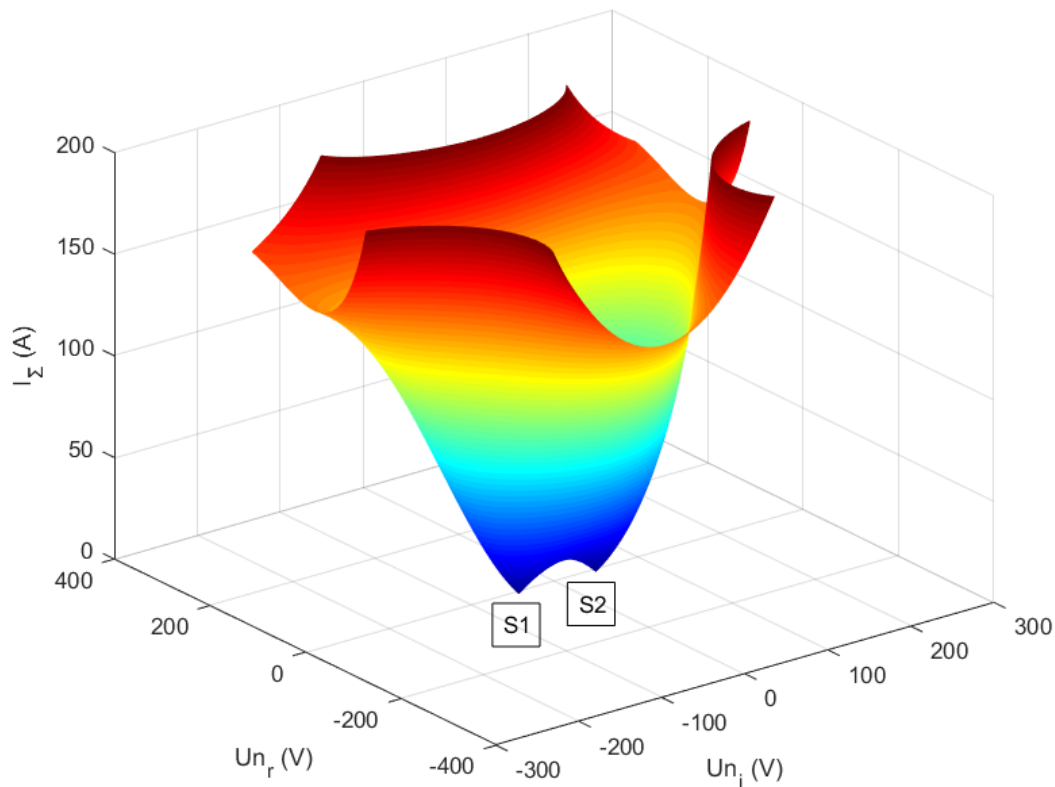


Figura 26: I_z para $R_g = 40 \Omega$.

De nuevo, se alcanzan dos posibles soluciones. Se pueden observar en la Tabla 3:

Tabla 3: Soluciones para $R_g = 40 \Omega$.

Solución	Valor solución Un (V)	Valor solución programa Un (V)
S1	$46,8914 \angle -98,6346^\circ$	$46,9084 \angle -98,6519^\circ$
S2	$46,8914 \angle 98,6346^\circ$	$46,9084 \angle 98,6519^\circ$

Es posible apreciar en los dos últimos casos que la S2 es la misma solución que S1, pero conjugada. Este hecho aparece en consonancia con los datos obtenidos por el programa, en el que se obtienen los datos en coordenadas polares, y el módulo se mantiene constante.

Como se ha podido comprobar en este epígrafe, al estudiarse un caso tan simple, las soluciones alcanzadas son iguales en módulos y opuestas en ángulos. En [5] se ilustra cómo en modelos más realistas las múltiples soluciones son más dispares.

4.3 Estudio de la influencia de los valores de puesta a tierra

A diferencia de lo deducido en el estudio aproximado descrito en el Capítulo III, y del que se infería un valor creciente en la tensión de neutro de la carga afectada a medida que empeoraba su puesta a tierra (es decir, aumentaba su resistencia de puesta a tierra R_g), a lo largo del desarrollo de este trabajo y tras numerosas simulaciones se han observado efectos contrarios, esto es, valores muy altos de la tensión del neutro para valores de R_g pequeños.

Lo anterior motivó el estudio paramétrico de la influencia del valor de R_g en la tensión de neutro, que es lo que se representa en los dos siguientes subapartados. Para ello, se ha optado por una red simple formada por un generador y una carga, tal y como se hiciera en el Capítulo III, pero esta vez añadiendo el modelo de la línea que los interconecta y adoptando un modelo de potencia constante para la carga. El primer subapartado es para un modelo de línea sin acoplar y el siguiente considerando los acoplamientos entre fases.

4.3.1 Línea sin acoplamientos entre fases

Primero se considera este caso de no acoplamiento más sencillo de analizar, lo cual permite simplificar la matriz de impedancias mediante el uso de la reducción de Kron [5], pudiendo diagonalizar la matriz Z y evitando la aparición de términos indeseados para el cálculo de la expresión analítica:

$$Z = \begin{bmatrix} Z_{aa} & Z_{ab} & Z_{ac} & Z_{an} \\ Z_{ba} & Z_{bb} & Z_{bc} & Z_{bn} \\ Z_{ca} & Z_{cb} & Z_{cc} & Z_{cn} \\ Z_{na} & Z_{nb} & Z_{nc} & Z_{nn} \end{bmatrix} \rightarrow Z_{modificada} = \begin{bmatrix} Z_a & 0 & 0 & 0 \\ 0 & Z_b & 0 & 0 \\ 0 & 0 & Z_c & 0 \\ 0 & 0 & 0 & Z_n \end{bmatrix}$$

Se parte de la expresión proveniente de la segunda ley de Kirchhoff:

$$U_n^0 - U_n^1 = Z_n \cdot I_n$$

Modificando dicha expresión mediante la primera ley de Kirchhoff:

$$I_n = -(I_a + I_b + I_c + \frac{U_n^1}{R_g})$$

Expresando las intensidades de cada rama en función de la potencia demandada por cada una:

$$S_a = U_a \cdot I_a^* \rightarrow I_a = \left(\frac{S_{an}}{U_n - U_a} \right)^*$$

Combinando las expresiones anteriores y operando se obtiene:

$$U_n^0 - U_n^1 = Z_n \cdot \left[- \left(\left(\frac{S_{an}}{U_n - U_a} \right)^* + \left(\frac{S_{bn}}{U_n - U_b} \right)^* + \left(\frac{S_{cn}}{U_n - U_c} \right)^* + \frac{U_n^1}{R_g} \right) \right]$$

Teniendo en cuenta que el generador se encuentra rígidamente puesto a tierra:

$$U_n^0 = 0 \text{ V} \rightarrow U_n^1 = Z_n \cdot \left[\left(\left(\frac{S_{an}}{U_n - U_a} \right)^* + \left(\frac{S_{bn}}{U_n - U_b} \right)^* + \left(\frac{S_{cn}}{U_n - U_c} \right)^* + \frac{U_n^1}{R_g} \right) \right]$$

$$U_n^1(S, U, Z_n, R_g) = Z_n \cdot \frac{\left(\left(\frac{S_{an}}{U_n - U_a} \right)^* + \left(\frac{S_{bn}}{U_n - U_b} \right)^* + \left(\frac{S_{cn}}{U_n - U_c} \right)^* \right)}{1 - \frac{Z_n}{R_g}}$$

Se obtiene una expresión analítica de la tensión de neutro como función de la potencia demandada por la carga, la tensión fase-neutro, la impedancia del neutro y la resistencia de puesta a tierra. Fijando las tres primeras variables, es posible parametrizar la función para R_g y graficarla, de tal manera que se pueda comparar con el perfil de las tensiones neutro-tierra obtenidas para cada valor de R_g por el programa.

Se fijan los valores de potencia a 63 kW, con una distribución de carga por fase [36,32,32] %. La tensión fase-neutro se fija en $\frac{400}{\sqrt{3}}$ V desfasados 120 grados. El valor de impedancia de la línea se corresponde con una línea de 500 m con cable de aluminio (Anexo I). La resistencia de puesta a tierra varía entre 0 Ω y 40 Ω .

La gráfica asociada a la tensión del neutro U_n puede observarse en la Figura 27, comparada con el perfil obtenido al representar las tensiones neutro-tierra calculadas por el programa, el cual adopta un modelo exacto para la línea sin desacoplamiento de las fases (modelo numérico).

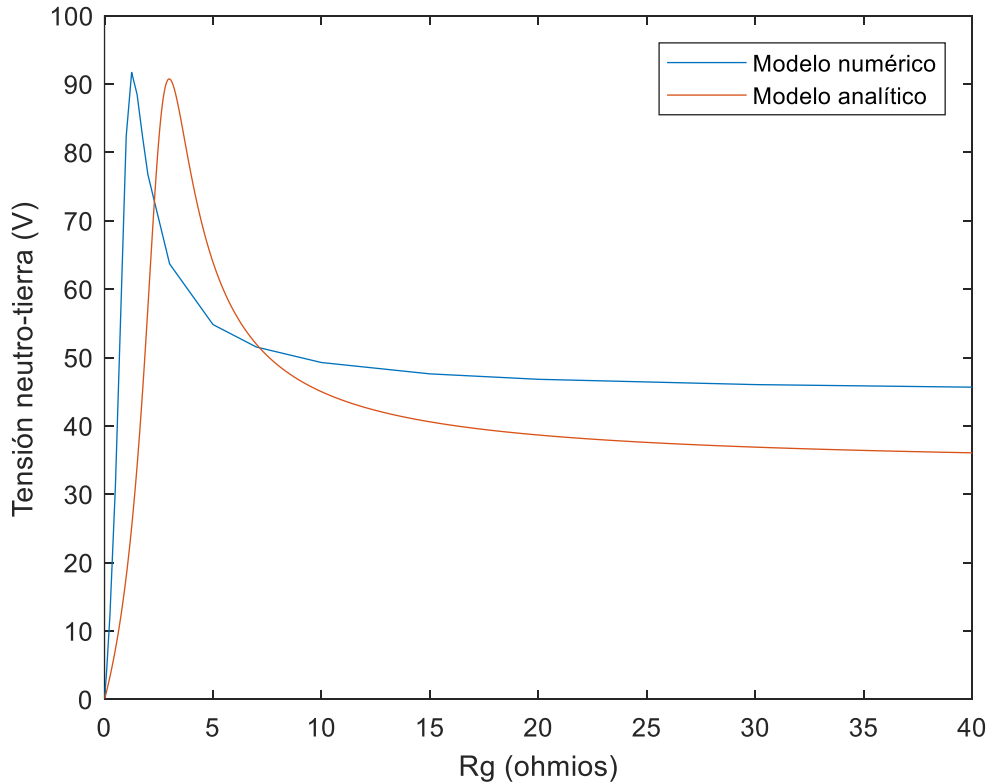


Figura 27: Comparativa expresión analítica simplificada y expresión numérica de la tensión neutro-tierra.

Como se puede apreciar, ambos modelos muestran la misma tendencia en la evolución, pero desplazada. En efecto, se confirma la relación existente entre la expresión analítica de la tensión de neutro y la tensión obtenida en la simulación parametrizando el valor de R_g . La diferencia existente entre ambas curvas se debe a la simplificación realizada anteriormente, donde no se considera el acoplamiento entre los cables.

4.3.2 Línea con acoplamientos entre fases

Para obtener una expresión más precisa de la tensión de neutro en función de R_g , resultaría necesario tener en cuenta los términos acoplados de la matriz de impedancia (términos no diagonales). Esto modifica ligeramente la expresión obtenida anteriormente:

Se parte de nuevo de la expresión proveniente de la segunda ley de Kirchhoff:

$$U_n^0 - U_n^1 = Z_{na} \cdot I_a + Z_{nb} \cdot I_b + Z_{nc} \cdot I_c + Z_{nn} \cdot I_n$$

Modificando dicha expresión mediante la primera ley de Kirchhoff:

$$I_n = -(I_a + I_b + I_c + \frac{U_n^1}{R_g})$$

Expresando las intensidades de cada rama en función de la potencia demandada por cada una:

$$S_a = U_a \cdot I_a^* \rightarrow I_a = \left(\frac{S_{an}}{U_n - U_a} \right)^*$$

Combinando las expresiones anteriores y operando se obtiene:

$$U_n^0 - U_n^1 = Z_{na} \cdot \left(\frac{S_{an}}{U_n - U_a} \right)^* + Z_{nb} \cdot \left(\frac{S_{bn}}{U_n - U_b} \right)^* + Z_{nc} \cdot \left(\frac{S_{cn}}{U_n - U_c} \right)^* + Z_{nn} \cdot \left[- \left(\left(\frac{S_{an}}{U_n - U_a} \right)^* + \left(\frac{S_{bn}}{U_n - U_b} \right)^* + \left(\frac{S_{cn}}{U_n - U_c} \right)^* + \frac{U_n^1}{R_g} \right) \right]$$

$$U_n^0 = 0 \text{ V} \rightarrow U_n^1 = (Z_{nn} - Z_{nc}) \cdot \left(\frac{S_{an}}{U_n - U_a} \right)^* + (Z_{nn} - Z_{nb}) \cdot \left(\frac{S_{bn}}{U_n - U_b} \right)^* + (Z_{nn} - Z_{na}) \cdot \left(\frac{S_{cn}}{U_n - U_c} \right)^* + Z_{nn} \cdot \frac{U_n^1}{R_g}$$

$$U_n^1(S, U, Z, R_g) = Z_{nn} \cdot \frac{\left((Z_{nn} - Z_{nc}) \cdot \left(\frac{S_{an}}{U_n - U_a} \right)^* + (Z_{nn} - Z_{nb}) \cdot \left(\frac{S_{bn}}{U_n - U_b} \right)^* + (Z_{nn} - Z_{na}) \cdot \left(\frac{S_{cn}}{U_n - U_c} \right)^* \right)}{1 - \frac{Z_{nn}}{R_g}}$$

De nuevo, se vuelven a fijar los parámetros S, U y Z con los mismos valores que en el caso anterior (Figura 28).

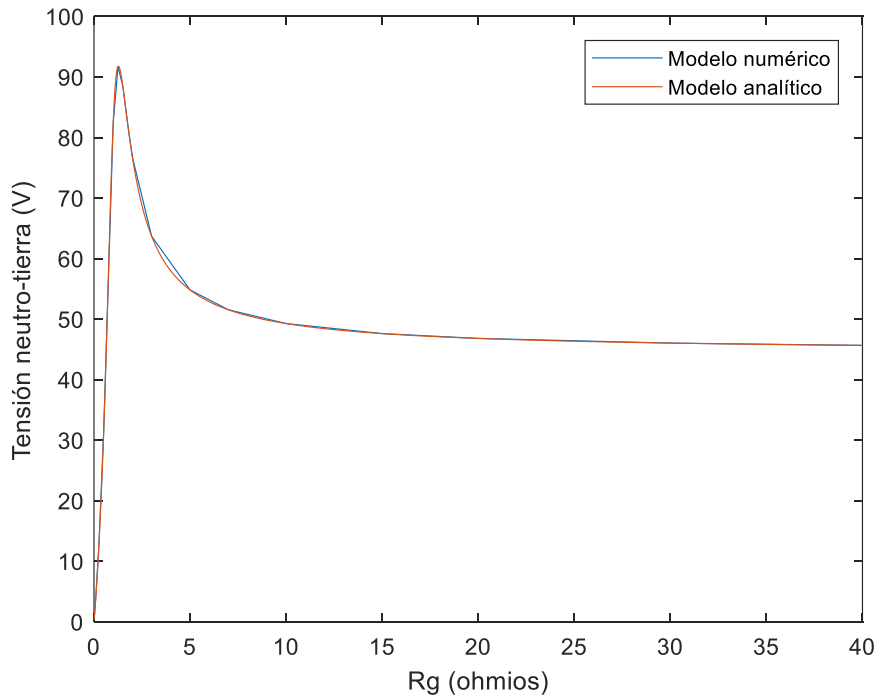


Figura 28: Comparativa expresión analítica completa y expresión numérica de la tensión neutro-tierra.

Como se puede comprobar, se consigue una expresión mucho más parecida al modelo programado. Las diferencias existentes entre ambas figuras se achacan a que la curva del modelo numérico se obtiene uniendo los valores discretos obtenidos por el programa. Los datos, en consonancia con el modelo simplificado, muestran una mayor tensión de neutro para valores de R_g pequeños. Estos resultados validan la herramienta de análisis de flujo de cargas utilizada y adaptada para el estudio de la rotura de neutro en la red distribuidora.

5 ANÁLISIS DE RESULTADOS: ROTURA EN EL NEUTRO DE LA RED

Una vez se ha confirmado que el modelo implementado replica correctamente el fenómeno de la rotura del neutro de la red, se procede a la simulación de distintos escenarios, modificando gradualmente la complejidad de la misma. Dos escenarios son contemplados: por una parte, se quiere conocer la influencia que provoca la rotura de una rama de la red en las cargas adyacentes a ella, planteándose una red con cargas en paralelo; por otra parte, también resulta importante conocer el efecto en cargas aguas abajo de la rotura, para ello, se plantea una red de mayores dimensiones, con una distribución similar a las redes de distribución de baja tensión en el ámbito residencial.

Todos los resultados obtenidos se han vuelto a validar con la herramienta utilizada en el proyecto PASTORA.

5.1 Red con cargas en paralelo

5.1.1 Nivel de desequilibrio sobre la carga afectada

Para analizar la influencia de la rotura del neutro en la carga afectada, se ha usado un modelo simple con un generador, un tramo común de 250 m y dos cargas en paralelo (Carga 3 y Carga 4), a 250 m respectivamente de la bifurcación. Todos los tramos se encuentran materializados con conductor de aluminio (Anexo I). Se presupone que las tensiones en el lado del generador son equilibradas.

El sistema se ha parametrizado, de tal manera que pueden variar diversas magnitudes:

- Grado de desequilibrio en la Carga 3 ([%Sa, %Sb, %Sc]). La otra (Carga 4) se considera equilibrada.
- Potencia demandada por las cargas.
- Resistencia de puesta a tierra en las cargas y en el tramo común.

En la Figura 29 podemos observar el esquema eléctrico del sistema descrito.

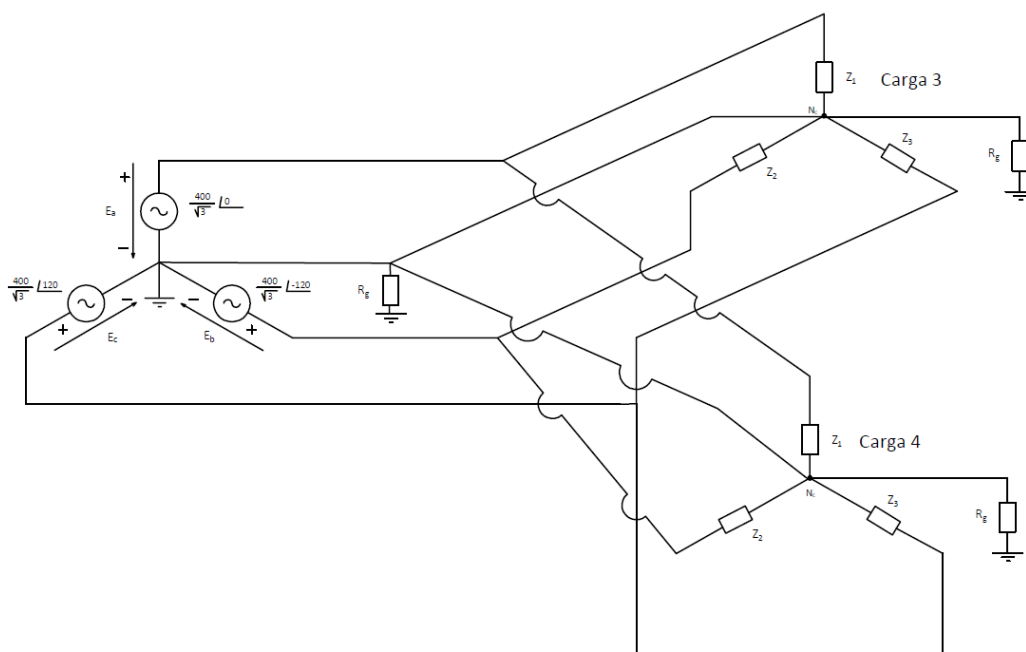


Figura 29: Red formada por dos cargas en paralelo, con un tramo común.

El objetivo de la parametrización anteriormente mencionada consiste en determinar cómo afecta la variación de dichos parámetros sobre las magnitudes eléctricas del sistema. Las conclusiones se han obtenido a partir de los resultados de los ensayos.

Se han estudiado cuatro escenarios de desequilibrio de carga y potencia demandada por las cargas. Para cada caso, se han simulado tres configuraciones de resistencia de puesta a tierra, variando para cada una el valor de la resistencia de puesta a tierra (R_g) en la carga afectada por la rotura del neutro:

- Caso 1: Desequilibrio de la carga [36,32,32], $P = 63$ kW
- Caso 2: Desequilibrio de la carga [36,32,32], $P = 126$ kW
- Caso 3: Desequilibrio de la carga [40,25,35], $P = 63$ kW
- Caso 4: Desequilibrio de la carga [40,25,35], $P = 126$ kW

5.1.1.1 Caso 1: Desequilibrio de la carga [36,32,32], $P = 63$ kW

Este escenario concibe una potencia de 63 kW, repartida de igual manera entre las dos cargas, de tal manera que cada una demanda 31,5 kW. Se supone que la carga de la rama en la que el neutro queda fuera de servicio (Carga 3) tiene un pequeño desequilibrio, mientras que la otra (Carga 4) se encuentra perfectamente equilibrada.

En cuanto a la configuración del sistema, se contemplan varias opciones. La puesta a tierra de la carga desequilibrada tomará valores oscilando entre los 0Ω y 40Ω . Mientras tanto, las resistencias de puesta a tierra de la carga equilibrada y de la bifurcación también tomaran valores extremos, siendo nulas o de un valor muy alto (considerándose prácticamente que no existe conexión a tierra). Así, se mostrarán tres escenarios, denotados a partir de este momento como $[R_{g0}, R_{g1}, R_{g2}, R_{g3}]$, siendo:

- R_{g0} : Resistencia de puesta a tierra del neutro del generador. Se considera que esta puesta a tierra es rígida, es decir, el valor de la resistencia es cero, para todos los casos.
- R_{g1} : Resistencia de puesta a tierra del nudo de bifurcación. Varía entre 0 (puesta a tierra rígida) y ∞ (no existe puesta a tierra).
- R_{g2} : Resistencia de puesta a tierra de la carga afectada por la rotura del neutro (Carga 3). Se parametriza entre $R_g = 0 \Omega$ y $R_g = 40 \Omega$.
- R_{g3} : La puesta a tierra de la carga equilibrada (Carga 4) puede ser rígida o no existir.

Usamos como parámetro estimador del desequilibrio de tensiones en la carga la tensión neutro-tierra (U_n).

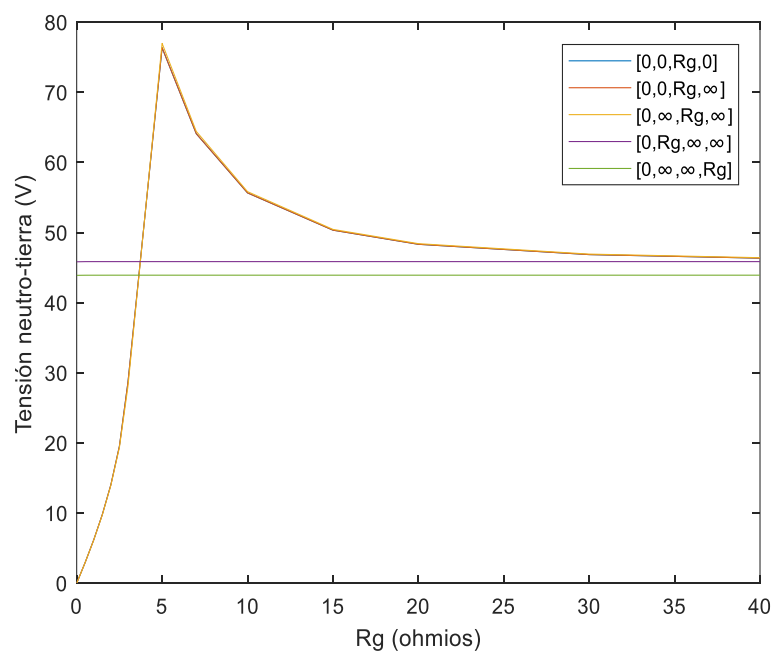


Figura 30: Tensión neutro-tierra en carga afectada para Caso 1.

Del análisis de los datos hecho posteriormente, se puede sentenciar que el escenario más desfavorable, por tanto, el más interesante para su estudio, es aquel en el cual se considera que no existe puesta a tierra en la bifurcación y en la carga adyacente ($R_g \approx \infty \Omega$).

Cabe destacar que en el caso extremo de que la resistencia de puesta a tierra sea muy buena (valores cercanos a 0Ω), en el que se dan resultados muy similares a los que se obtienen para el caso en el que no hay rotura de neutro. Esto se debe a que se proporciona un camino de retorno a través de la tierra, que actúa como neutro improvisado al no estar cerrado el circuito a través del neutro.

5.1.1.2 Caso 2: Desequilibrio de la carga [36,32,32], $P = 126 \text{ kW}$

Para este caso, se ha querido estudiar cómo afecta un aumento de demanda de potencia por parte de ambas cargas (63 kW cada una). Al igual que anteriormente, el caso más desfavorable se produce con una configuración $[0, \infty, R_g, \infty]$, como puede apreciarse en la Figura 31.

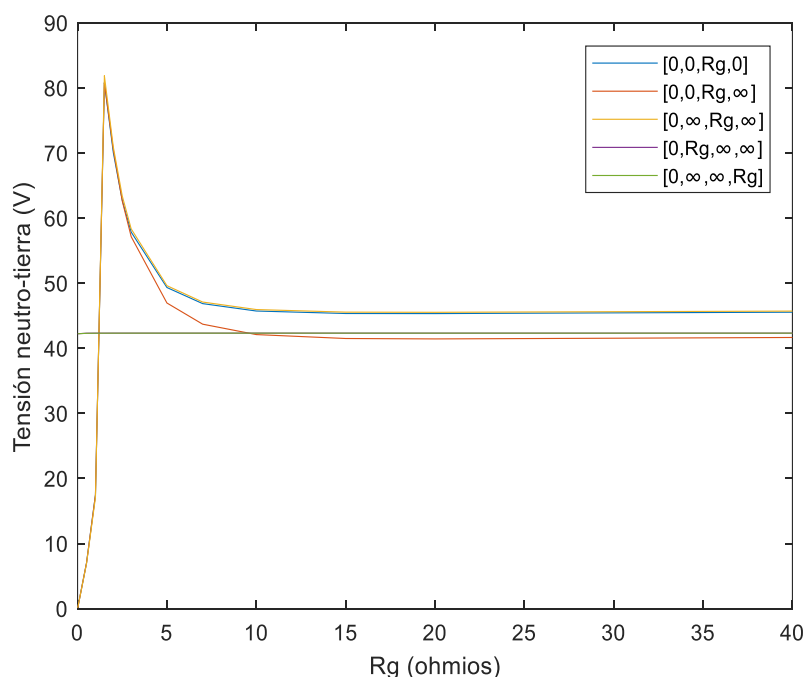


Figura 31: Tensión neutro-tierra en carga afectada para Caso 2.

Los resultados arrojan que el valor máximo de U_n es mayor en este caso que en el anterior. Por tanto, se confirma la influencia de una mayor demanda sobre el desequilibrio de tensiones e intensidades. En este caso de estudio, también resulta interesante indicar que de nuevo se obtiene un mayor grado de desequilibrio para $R_g = 2 \Omega$, en vez de sobre 40Ω .

5.1.1.3 Caso 3: Desequilibrio de la carga [40,25,35], $P = 63 \text{ kW}$

Una vez se ha comprobado la influencia de un aumento de demanda de las cargas sobre el grado de desequilibrio del sistema, se procede a comprobar el efecto del desequilibrio de la Carga 3 sobre la Carga 4, en el caso de existir rotura de neutro. Para este caso, se ha querido usar un caso aún más realista, con un grado de desequilibrio de carga de $[40,25,35]$ (Figura 32):

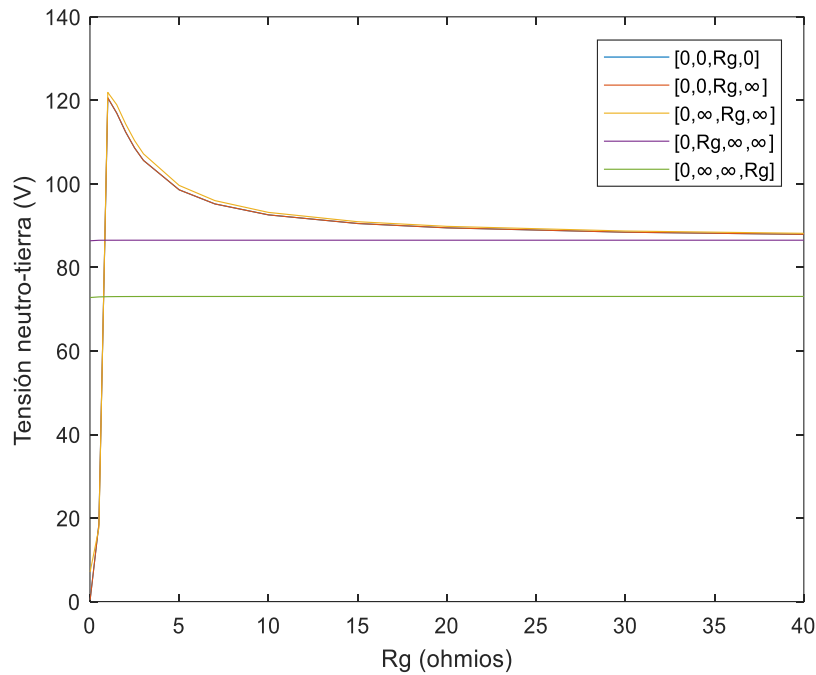


Figura 32: Tensión neutro-tierra en carga afectada para Caso 3.

Una vez más, el caso más representativo resulta ser el $[0, \infty, Rg, \infty]$. Se comprueba el alto grado de correlación entre aumento de desequilibrio en la carga afectada y el aumento de desequilibrio de tensiones e intensidades en la Carga 3.

5.1.1.4 Caso 4: Desequilibrio de la carga $[40,25,35]$, $P = 126 \text{ kW}$

Este caso sigue una tendencia similar a los estudiados anteriormente, es decir, se confirma la influencia del desequilibrio y de la demanda de potencia de la carga afectada. En la Figura 33 se puede observar los valores alcanzados por la tensión neutro-tierra para cada escenario.

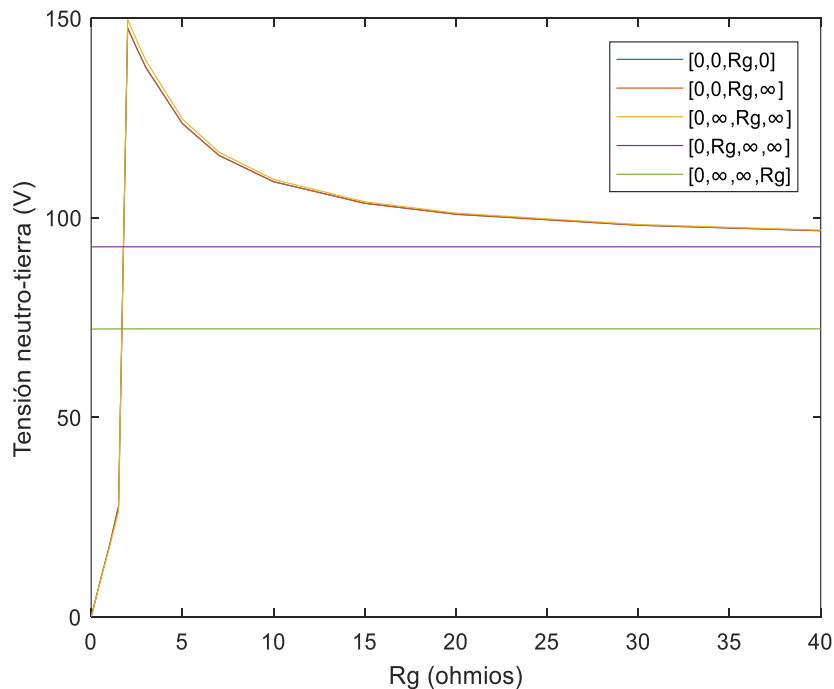


Figura 33: Tensión neutro-tierra en carga afectada para Caso 4.

Del análisis de las figuras anteriores se pueden sacar las siguientes conclusiones:

- La importancia del grado de desequilibrio en la potencia demandada por cada fase, y el valor de dicha potencia.
- Se aprecia que el caso más desfavorable es aquel en que no hay puesta a tierra en el tramo común ni en la carga adyacente $[0, \infty, R_g, \infty]$.
- Es posible afirmar que, para valores de resistencia de puesta a tierra pequeños, se obtienen resultados más desequilibrados que para malas puestas a tierra (R_g de valor elevado). Este resultado sigue la tendencia observada en el epígrafe anterior, donde también se producía el fenómeno.

Para cuantificar los niveles de sobretensión y subtensión que aparecen sobre las fases de la carga afectada, se muestran a continuación los valores detallados de las tensiones fase-neutro para dos escenarios:

5.1.1.5 Caso 2: Desequilibrio de la carga [36,32,32], $P = 126 \text{ kW}$

Los resultados, obtenidos para el máximo desequilibrio ($R_g \approx 2 \Omega$) y con la configuración más desfavorable se muestran en la Tabla 4. Se observan grandes desequilibrios en la tensión fase-tierra, poniendo en riesgo el correcto funcionamiento de dispositivos monofásicos y trifásicos que operen con la tensión nominal de la red.

Tabla 4: Diferencias porcentuales de las tensiones fase-neutro para neutro roto (Caso 2). $R_g = 2 \Omega$.

	Neutro Intacto	Neutro roto	Diferencia porcentual (%)
Ua - Un (V)	211,3818	256,7203	21,49
Ub - Un (V)	216,6661	263,7542	21,73
Uc - Un (V)	215,5105	135,8991	-36,94
Un (V)	2,0503	70,9086	-

Así mismo, también se ha querido resaltar una situación en la que la tensión del neutro se estabiliza ($R_g = 40 \Omega$). Los resultados se muestran en la Tabla 5.

Tabla 5: Diferencias porcentuales de las tensiones fase-neutro para neutro roto (Caso 2). $R_g = 40 \Omega$.

	Neutro Intacto	Neutro roto	Diferencia porcentual (%)
Ua - Un (V)	211,2057	218,6633	3,54
Ub - Un (V)	216,8154	257,2630	18,65
Uc - Un (V)	215,5382	174,1410	-19,21
Un (V)	2,2822	45,7063	-

Es posible observar la atenuación de las diferencias porcentuales, respecto al caso $R_g = 2 \Omega$, donde se producen los mayores desequilibrios de tensiones e intensidades en la red.

5.1.1.6 Caso 4: Desequilibrio de la carga [40,25,35], $P = 126 \text{ kW}$

Al igual que en el caso anterior, se aprecian desequilibrios en las tensiones entre fase y neutro, en este caso de mayor magnitud debido al mayor desequilibrio de potencia demandada por cada fase. Otra vez, se escogen las condiciones más desfavorables ($R_g \approx 2 \Omega$ y configuración $[0, \infty, R_g, \infty]$). Los resultados se pueden observar en

la Tabla 6.

Tabla 6: Diferencias porcentuales de las tensiones fase-neutro para neutro roto (Caso 4). $R_g = 2 \Omega$.

	Neutro Intacto	Neutro roto	Diferencia porcentual (%)
Ua - Un (V)	208,2040	290,5201	39,53
Ub - Un (V)	224,4585	87,3744	-61,07
Uc - Un (V)	210,8020	295,5277	40,19
Un (V)	6,4343	114,3461	-

De nuevo, en la Tabla 7 se muestran los resultados alcanzados cuando $R_g = 40 \Omega$.

Tabla 7: Diferencias porcentuales de las tensiones fase-neutro para neutro roto (Caso 4). $R_g = 40 \Omega$.

	Neutro Intacto	Neutro roto	Diferencia porcentual (%)
Ua - Un (V)	207,9382	265,7631	27,81
Ub - Un (V)	225,0065	123,0972	-45,29
Uc - Un (V)	210,5299	274,9690	30,61
Un (V)	7,1307	88,1653	-

5.1.2 Límites admisibles de desequilibrio de las cargas

Se establece por normativa que “los límites máximos de variación de la tensión de alimentación a los consumidores finales serán de ± 7 por 100 de la tensión de alimentación declarada” [7]. Por tanto, resulta importante, desde el punto de vista de la compañía eléctrica encargada de la distribución, velar para que no se sobrepasen dichos límites. Así, se va a calcular de manera experimental el valor máximo de desequilibrio de la carga afectada cuando se rompe el neutro, de tal manera que no se supere en ninguna de las dos cargas existentes dichos valores. Con la tolerancia admitida por normativa, el intervalo admisible sería entre 214,774 V y 247,106 V para las tensiones fase-neutro.

Se fijará la demanda de carga total en 63 kW (31,5 kW por carga), debido a que cargas superiores provocan caídas de tensión en normal funcionamiento fuera de este rango. Se volverá a establecer un sistema con configuración $[0, \infty, R_g, \infty]$, por ser el más desfavorable. La resistencia de puesta a tierra tomará los valores 0Ω , 2Ω y 40Ω . Para cada uno de estos valores de R_g , se determinará cuál es el mayor grado de desequilibrio de carga admisible. Dichos valores se muestran en la Tabla 8.

Tabla 8: Desequilibrios máximos admisibles para cumplir con la normativa.

$R_g (\Omega)$	Desequilibrio (%)
0	[45,25,30]
2	(*)
40	[33.4,33.2,33.4]

(*) No existe valor de equilibrio para el cual se cumpla la normativa vigente.

Como se observa en la tabla anterior, es necesario que la carga se encuentre prácticamente equilibrada para no obtener valores que superen o sean menores a los estipulados por la norma. Sin embargo, si la puesta a tierra está correctamente ejecutada, y los valores son muy bajos (cerca de 0Ω), se pueden adoptar desequilibrios de la carga mayores, puesto que la puesta a tierra ‘absorbe’ dichos desequilibrios, fijando el neutro de la carga.

5.1.3 Límites admisibles de resistencias de puesta a tierra

Al igual que anteriormente, se consideran como valores límite 214,774 V y 247,106 V. De nuevo, las cargas tendrán una demanda de 63 kW para evitar que se produzcan valores por debajo del límite inferior en condiciones de funcionamiento normal.

Se han establecido dos posibles escenarios de desequilibrio de la carga, uno prácticamente equilibrado, [36,32,32], y otro donde el desequilibrio es más acusado, pero realista, [40,25,35]. La configuración de puesta a tierra en ambas ocasiones es la más desfavorable, $[0, \infty, R_g, \infty]$.

5.1.3.1 Caso 1: Desequilibrio de la carga [36,32,32], $P = 63 \text{ kW}$

Para evitar tener situaciones de subtensión o sobretensión (esto es, por debajo del $\pm 7\%$ de la tensión nominal del sistema) cuando se rompe el neutro, es necesario que la resistencia de puesta a tierra de la carga afectada tome valores por debajo de $1,2 \Omega$. Con valores por encima de dicha magnitud, se obtendrán en la carga afectada por la rotura del neutro una tensión fase-neutro fuera de los límites marcados por la normativa. En la Figura 38 se puede apreciar el valor de tensión alcanzado por cada fase para diferentes valores de R_g .

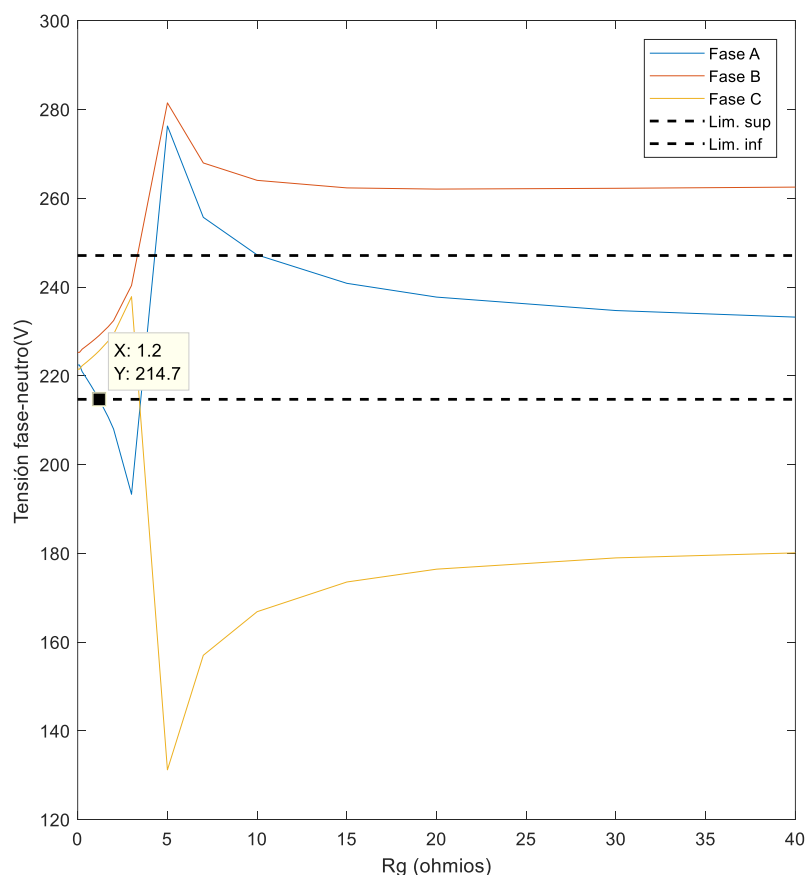


Figura 34: Perfil de tensiones fase-neutro para Caso 1.

5.1.3.2 Caso 3: Desequilibrio de la carga [40,25,35], P = 63 kW

En este caso, el nivel de desequilibrio es mayor y se alcanzarán niveles de sobretensión y subtensión mayores, como se ha estudiado en diversos casos anteriores. Resulta intuitivo, por tanto, establecer que el valor de la resistencia de puesta a tierra debe ser inferior que en el caso anterior, para favorecer la labor de dicha conexión a tierra a despejar la falta provocada por la rotura del neutro.

En efecto, se ha ensayado el sistema, obteniendo en este caso que la R_g debe ser menor a $0,75 \Omega$ para no alcanzar valores fuera de límites, tal y como se observa en la Figura 39.

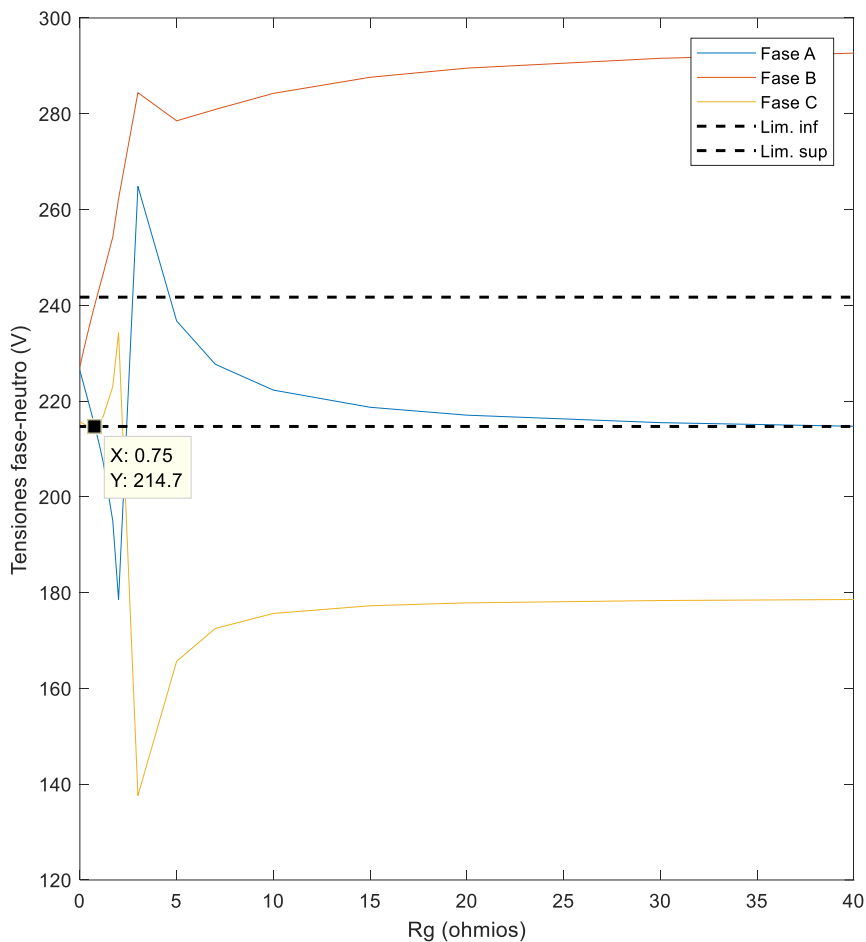


Figura 35: Perfil de tensiones fase-neutro para Caso 3.

5.1.4 Influencia de la rotura sobre cargas adyacentes

Para analizar la influencia de la rotura del neutro para cargas adyacentes a la rama afectada (en este caso, la Carga 4), se ha vuelto a utilizar el modelo simple con un generador, un tramo común de 250 m y dos cargas en paralelo, a 250 m respectivamente de la bifurcación.

Se han estudiado los cuatro escenarios de desequilibrio de carga y potencia demandada por las cargas que se plantearon para el estudio de la Carga 3 (carga afectada por la rotura). Como medida del desequilibrio de la red, se volverá a utilizar la tensión neutro-tierra.

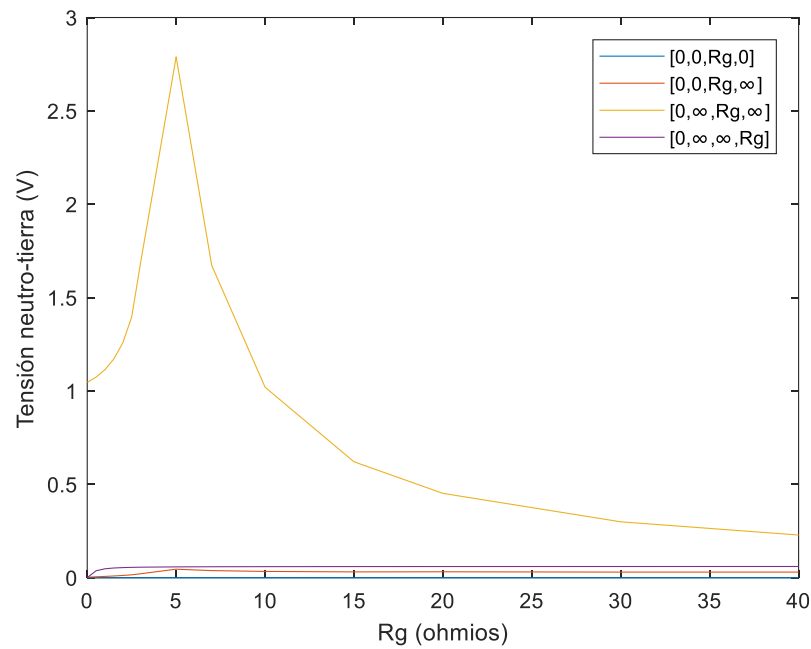


Figura 36: Tensión neutro-tierra en carga adyacente para Caso 1.

Queda demostrado que, para ciertos valores de resistencia a puesta a tierra en la Carga 3, aparece un mayor desequilibrio de tensiones e intensidades en la Carga 4, por tanto, existe influencia de la rotura del neutro sobre dicha carga, y esta influencia se ve incrementada si no existe puesta a tierra en el tramo común de circuito.

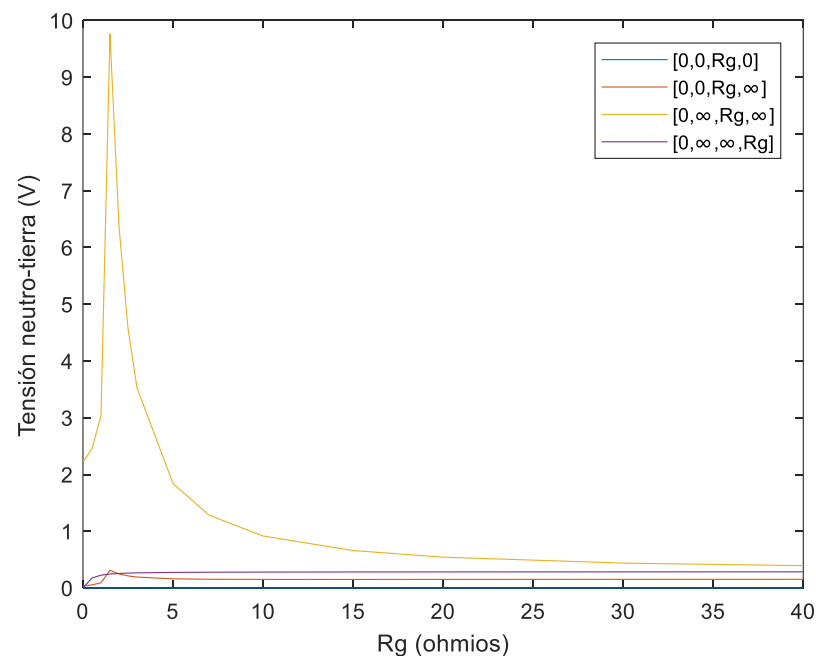


Figura 37: Tensión neutro-tierra en carga adyacente para Caso 2.

Los resultados arrojan que el valor máximo de U_n es mayor en este caso que en el anterior, superando valores máximos recomendados [1]. Esto se debe debido al aumento de demanda de potencia por parte de ambas cargas.

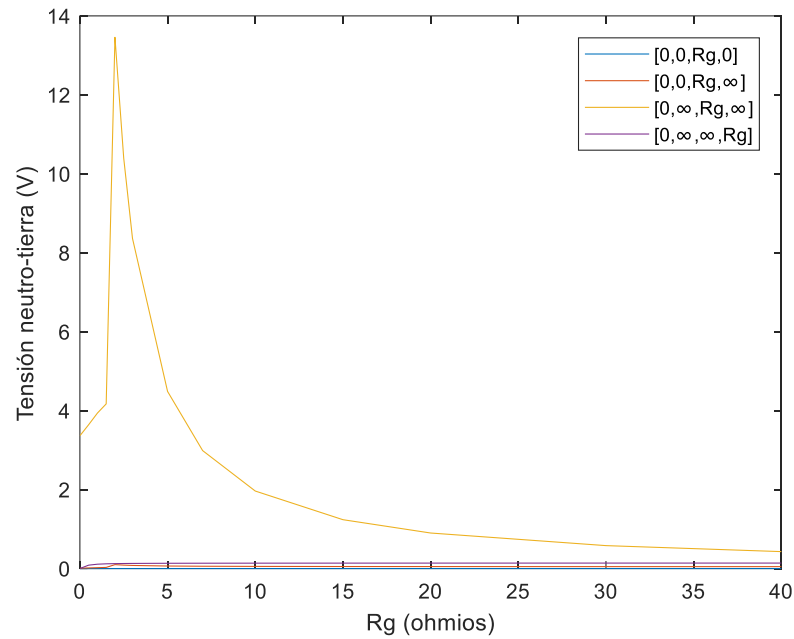


Figura 38: Tensión neutro-tierra en carga adyacente para Caso 3.

El aumento del desequilibrio de la Carga 3 afecta negativamente a la Carga 4, donde se alcanzan valores más altos de tensión neutro-tierra (Figura 38).

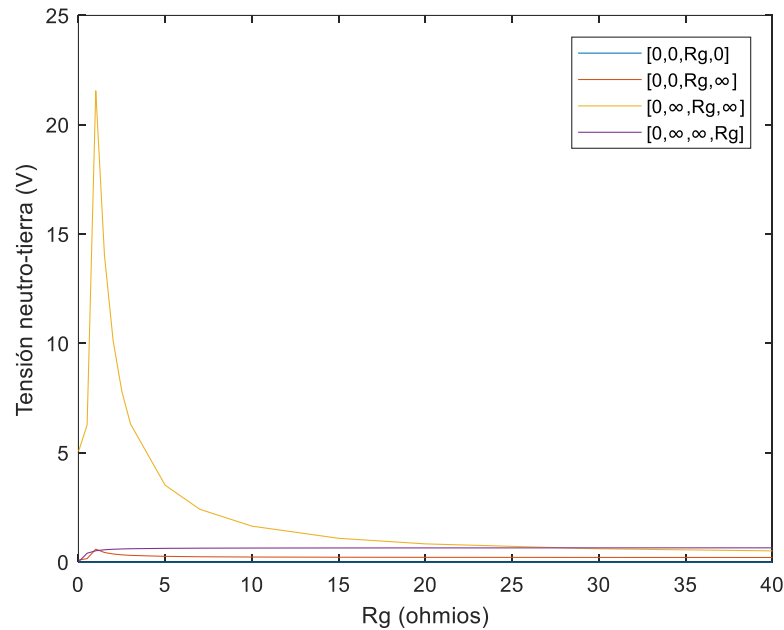


Figura 39: Tensión neutro-tierra en carga adyacente para Caso 4.

Es posible comprobar el efecto desestabilizador debido a la rotura del neutro sobre la carga adyacente (Carga 4). Se observa dependencia respecto al grado de desequilibrio de la red y a las solicitaciones de la carga. También resulta interesante indicar que, para valores de R_g pequeños ($R_g \approx 2 \Omega$), se obtiene el mayor grado de desequilibrio, en vez de casos de puesta a tierra deficientes (valores de R_g altos). En las figuras 36, 37, 38 y 39 se ha podido comprobar dicha tendencia.

A modo de resumen, se puede afirmar después del análisis cualitativo del sistema, la aparición de los siguientes fenómenos sobre las cargas adyacentes a la afectada:

- Que existe influencia sobre cargas adyacentes de la rotura del neutro de una carga, generando desequilibrios importantes sobre ellas (superando valores recomendados en la mayoría de casos).
- Que este desequilibrio se ve afectado según la naturaleza de puestas a tierra del sistema. A diferencia de lo planteado en el Capítulo III, donde se llega a la conclusión de que una mala puesta a tierra favorece el aumento de la tensión de neutro, parece ser que para valores pequeños de R_g , el sistema sufre un desequilibrio de tensiones e intensidades mayor que para resistencias de puesta a tierra de mayor magnitud. Por tanto, si bien una puesta a tierra siempre se ha concebido como una mejora de la red de distribución, parece ser que ante una rotura de neutro de la red la respuesta es más adecuada para valores mayores de R_g .
- Que existe correlación directa entre la potencia demandada por la carga y el grado de desequilibrio de tensiones e intensidades que aparece al producirse la rotura del neutro.
- Que existe correlación directa entre el grado de desequilibrio entre fases de la potencia demandada por la carga afectada, y el desequilibrio obtenido al romperse el neutro.

5.2 Red residencial CIGRE

5.2.1 Desequilibrios de tensión en las cargas

Una vez que se ha analizado una red simple formada por un generador y dos cargas en paralelo, se procede al estudio cualitativo de una red de tipo residencial. Esta red de baja tensión, adoptada del Consejo Internacional de Grandes Redes Eléctricas (CIGRE), posee tres tipos de subredes (residencial, industrial y comercial) [8]. Para nuestro estudio, se ha tenido en cuenta solamente la subred residencial, realizando modificaciones de tal manera que se eliminan los transformadores en cabecera de la red, y se sustituyen las puestas a tierra rígidas por resistencias de valor finito ($R_g \approx 0 \Omega$). La topología de la red descrita puede observarse en la Figura 40.

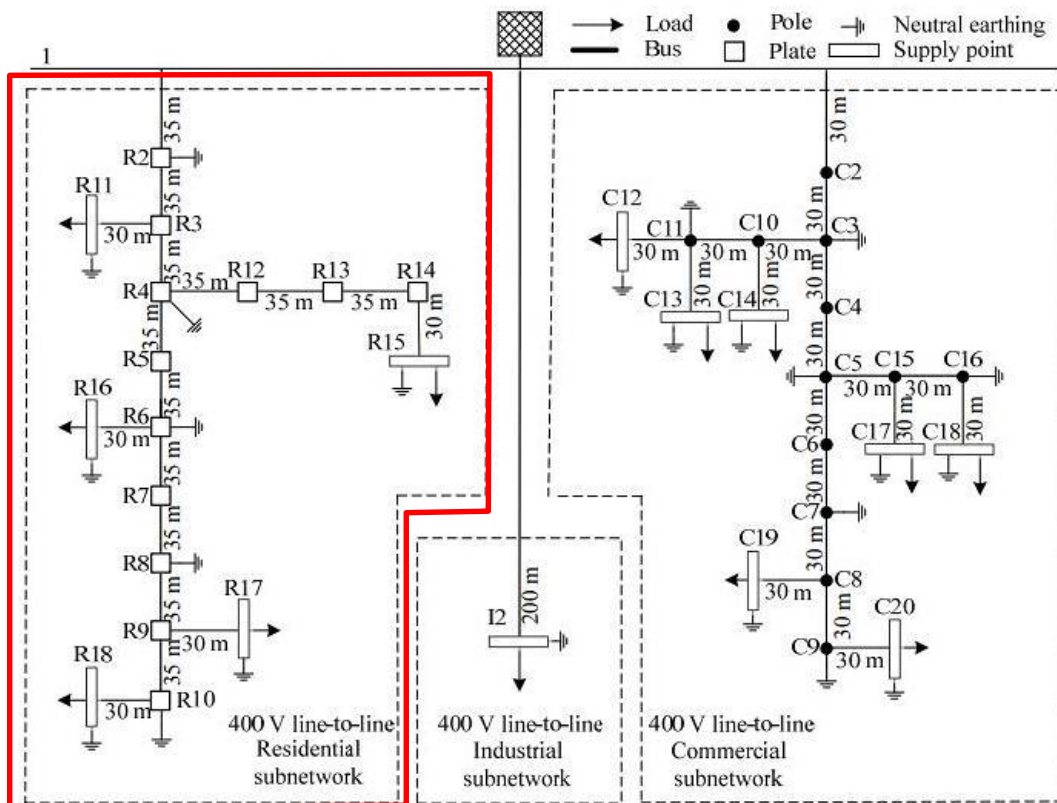


Figura 40: Modelo europeo de red de distribución en baja tensión CIGRE. Subred residencial.

De nuevo, se ha realizado una parametrización del sistema, de tal manera que pueden variar diversas magnitudes:

- Grado de desequilibrio en la carga ($[\%S_a, \%S_b, \%S_c]$)
- Potencia demandada por las cargas
- Resistencia de puesta a tierra en las cargas
- Rama en la que se produce la rotura del neutro

Esta última es una nueva condición que no aparecía en la red anterior, puesto que se quiere estudiar las consecuencias sobre las cargas aguas debajo de la rotura de neutro.

Para facilitar el estudio, se ha supuesto que todas las resistencias de puesta a tierra R_g toman el mismo valor, siendo esta una variable del análisis. De igual manera, la potencia demandada se modulará de manera uniforme para todas las cargas mediante un parámetro P partiendo de los valores establecidos por el CIGRE (Tabla 9), y el desequilibrio adoptado por todas las cargas será el mismo.

Tabla 9: Cargas en los nodos de la subred residencial CIGRE.

Bus	Carga (kW)	Factor de potencia
R11	15	0,95
R15	52	0,95
R16	55	0,95
R17	35	0,95
R18	47	0,95

Antes de realizar el análisis, será necesario realizar la comparación entre las nomenclaturas adoptadas en MATLAB y CIGRE. En la Tabla 10 aparece la equivalencia para cada nudo de la red.

Tabla 10: Equivalencia buses MATLAB-CIGRE.

Nomenclatura MATLAB	Nomenclatura CIGRE
1	1
2	R2
3	R3
4	R4
5	R5
6	R6
7	R7
8	R8
9	R9
10	R10
11	R11
12	R12
13	R13
14	R14
15	R15
16	R16
17	R17
18	R18

De manera análoga, la misma equivalencia se ha realizado para cada rama de la red, como puede apreciarse en la Tabla 11:

Tabla 11: Equivalencia ramas MATLAB-CIGRE.

Nomenclatura MATLAB	Nomenclatura CIGRE
1	1 - R2
2	R2 - R3
3	R3 - R4
4	R4 - R5
5	R5 - R6
6	R6 - R7
7	R7 - R8
8	R8 - R9
9	R9 - R10
10	R3 - R11
11	R4 - R12
12	R12 - R13
13	R13 - R14
14	R14 - R15
15	R6 - R16
16	R9 - R17
17	R10 - R18

Resulta de interés comprobar si el desequilibrio que se induce por la rotura del neutro de la red afecta a las tensiones fase-neutro. Estas tensiones resultan muy importantes en una red del tipo residencial, en la que la mayoría de cargas son monofásicas y se encuentran conectadas entre una de las fases y el neutro.

Se analizará dichas tensiones para cada fase. Estas se compararán con los límites establecidos por la normativa vigente ($\pm 7\%$ de la tensión nominal), para comprobar el rango de operación en el que la calidad del suministro de la red es correcta.

Al igual que en el epígrafe anterior, se irán variando diversos parámetros para comprobar cómo afectan al sistema. En cada caso se indicará el valor establecido para cada parámetro: desequilibrio de la carga, un factor multiplicador P, valor de resistencia de puesta a tierra y tramo en el que se produce la rotura.

5.2.1.1 Caso 1: $[\frac{100}{3}, \frac{100}{3}, \frac{100}{3}]$, $P = 1$, $R_g = 0$, Rotura rama 17

El primer caso a analizar concierne una red en buenas condiciones de operación, es decir, las cargas se encuentran perfectamente equilibradas y las resistencias de puesta a tierra son buenas, adoptando valores prácticamente nulos. La rotura se produce en el extremo de la red aguas abajo.

Para analizar el desequilibrio existente cuando se produce la rotura, se utilizará la tensión fase-neutro de cada nudo. Los resultados obtenidos para la red se pueden observar en la Figura 41.

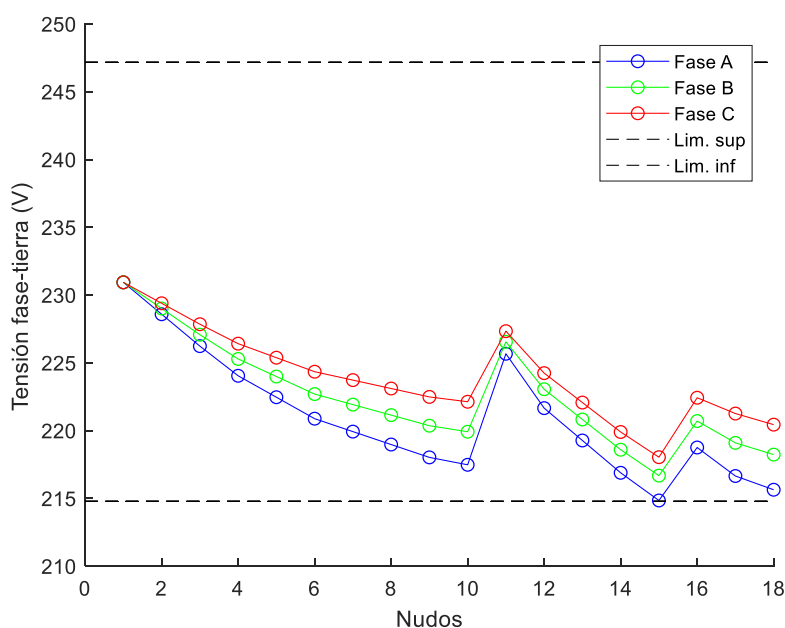


Figura 41: Perfil de tensiones fase-neutro por fases (Caso 1).

Es posible comprobar cómo, gracias al equilibrado de las cargas y una buena resistencia de puesta a tierra, se consiguen valores dentro del intervalo permitido por la normativa vigente.

5.2.1.2 Caso 2: [36,32,32], $P = 1$, $R_g = 0$, Rotura rama 17

Se procederá a aumentar el desequilibrio de carga en la red para comprobar si este parámetro afecta al desequilibrio de tensiones e intensidades en la carga.

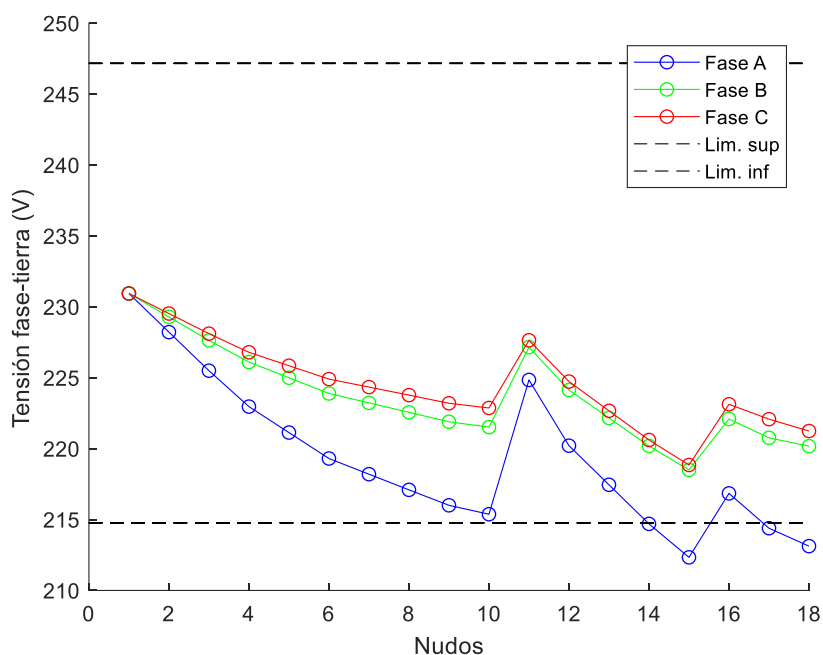


Figura 42: Perfil de tensiones fase-neutro por fases (Caso 2).

Debido al desequilibrio de las cargas que se ha inducido, se puede comprobar en la Figura 42 como para los buses R15, R17 y R18 se produce una subtensión para la fase A, mientras que las otras dos se encuentran dentro de parámetros permitidos. Resulta interesante indicar la importancia que tiene un buen equilibrado de las cargas

entre fases para evitar que se produzcan sobretensiones y subtensiones no deseadas.

5.2.1.3 Caso 3: [36,32,32], $P = 1,7$, $R_g = 0$, Rotura rama 17

Una vez se conoce el efecto del desequilibrio de la carga en una red de mayor dimensión, se quiere validar si ocurre lo mismo al aumentar la demanda. Para ello, se aumenta el valor de todas las cargas mediante un factor $P = 1,7$.

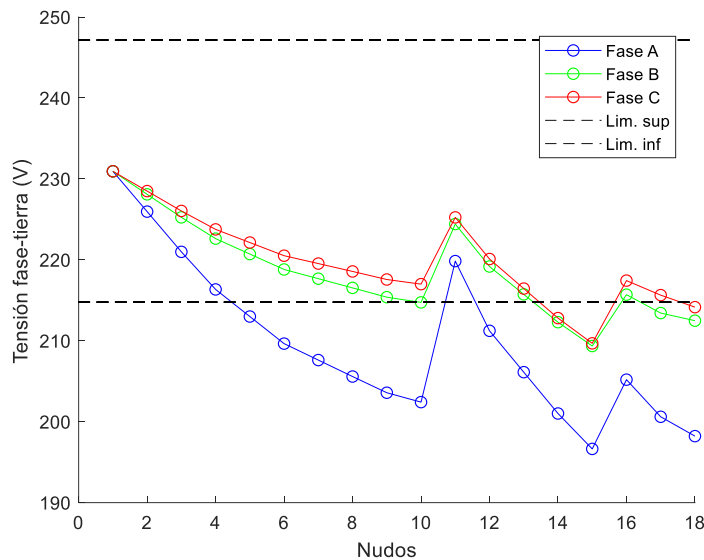


Figura 43: Perfil de tensiones fase-neutro por fases (Caso 3).

De nuevo, queda constatado la importancia del correcto dimensionamiento de la red (Figura 43). En este caso, un aumento de la demanda de carga provoca que se vea incrementado el efecto desestabilizador de la rotura del neutro, provocando que para el nodo R15 se obtengan subtensiones para todas las fases, así como subtensiones en algunas fases de manera localizada.

5.2.1.4 Caso 4: [36,32,32], $P = 1,7$, $R_g = 2$, Rotura rama 17

Se procede ahora a aumentar el valor de resistencia de puesta a tierra de todos los nodos de la red. Es conocido que para valores de R_g pequeños se obtiene un desequilibrio del sistema mayor que en casos de resistencias de puesta a tierra más altas. En la Figura 44 se observa el perfil de tensiones fase-neutro de la red.

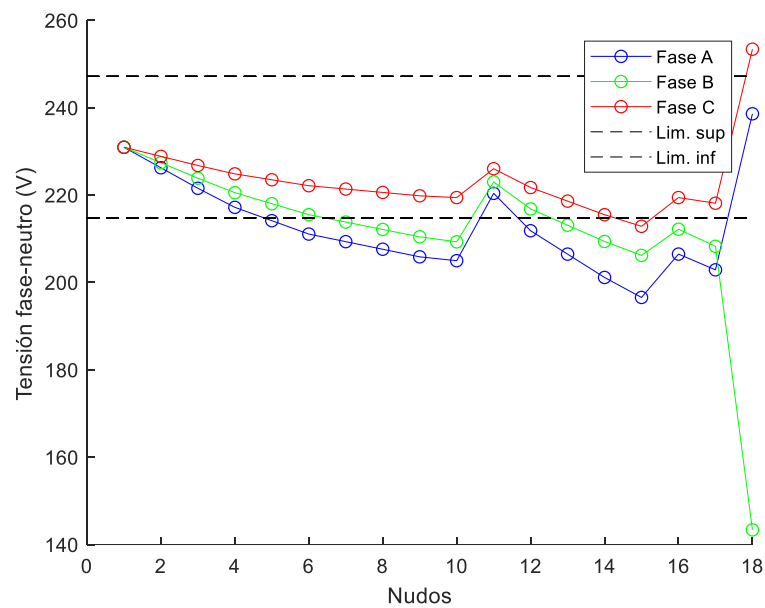


Figura 44: Perfil de tensiones fase-neutro por fases (Caso 4).

Se puede comprobar el efecto desestabilizador en el bus afectado por la rotura del neutro. Las tensiones fase-neutro sufren tal desequilibrio que la fase B sufre una subtensión pronunciada y la fase C, una sobretensión elevada. La mayoría del resto de buses sufren una subtensión en la fase A, producto de la mala puesta a tierra, la sobrecarga y el desequilibrio de carga entre fases.

5.2.1.5 Caso 5: [36,32,32], $P = 1'7$, $R_g = 40$, Rotura rama 17

Se quiere profundizar en la correlación existente entre el valor de la resistencia de puesta a tierra y el desequilibrio de la red. Por ello, se pretende estudiar el sistema cuando adopta valores de R_g altos, lo cual conlleva una puesta a tierra deficiente (Figura 45).

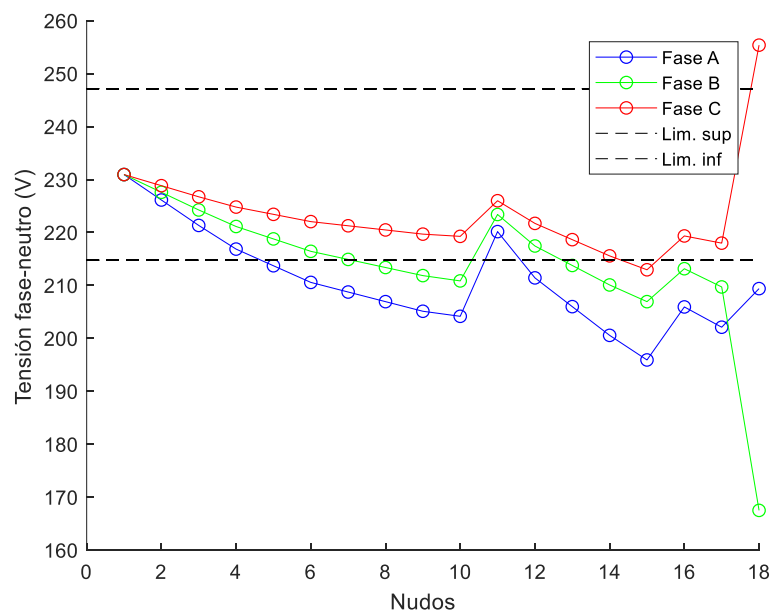


Figura 45: Perfil de tensiones fase-neutro por fases (Caso 5).

Se puede constatar que, aun existiendo un desequilibrio notable en el nodo afectado, este se reduce respecto al caso en el que la R_g es más pequeña ($R_g = 2 \Omega$).

5.2.1.6 Caso 6: [36,32,32], $P = 1'7$, $R_g = 40$, Rotura rama 7

En este caso, se pretende simular que la rotura de neutro se produce algo más arriba en la red, de tal manera que se pueda analizar qué sucede en los nodos agua debajo de la rotura.

Al producirse la rotura del neutro en un punto más cercano al nudo slack, aguas abajo se produce un desequilibrio generalizado de las intensidades y tensiones de los buses afectados, tal y como podemos observar en la Figura 46:

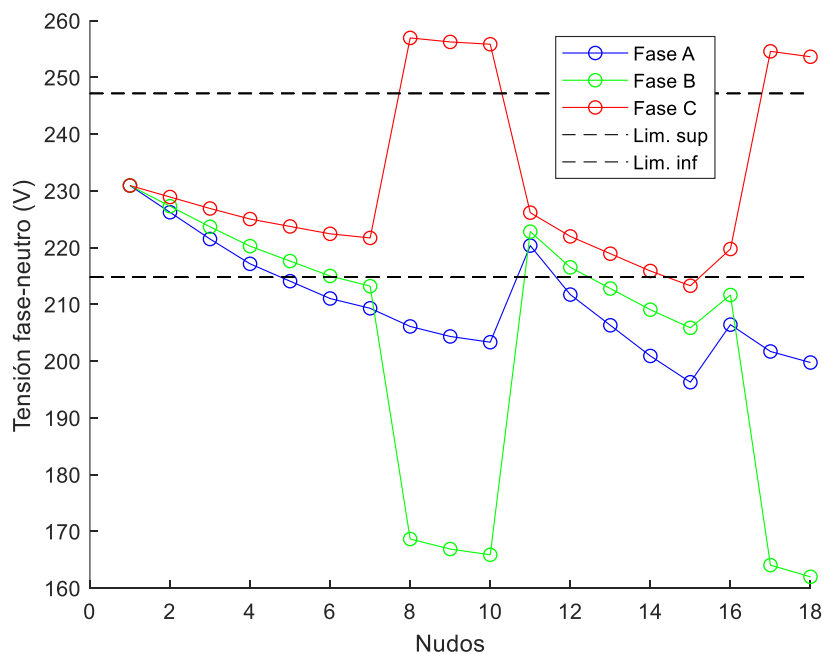


Figura 46: Perfil de tensiones fase-neutro por fases (Caso 6).

En efecto, los nudos R8, R9, R10, R17 y R18, que son aquellos que se encuentran por debajo de la incidencia, presentan sobretensiones en la fase C y subtensiones en la fase B, producto del fenómeno anterior.

5.2.1.7 Caso 7: [36,32,32], $P = 1'7$, $R_g = 40$, Rotura rama 3

Es necesario comprobar si la tendencia de que la rotura desequilibra las tensiones e intensidades en buses aguas abajo resulta cierta. Para ello, se rompe la rama que une R3 con R4.

Se puede comprobar en la Figura 47 cómo se expande el desequilibrio por la red cuando la rotura se produce más cercana a cabecera.

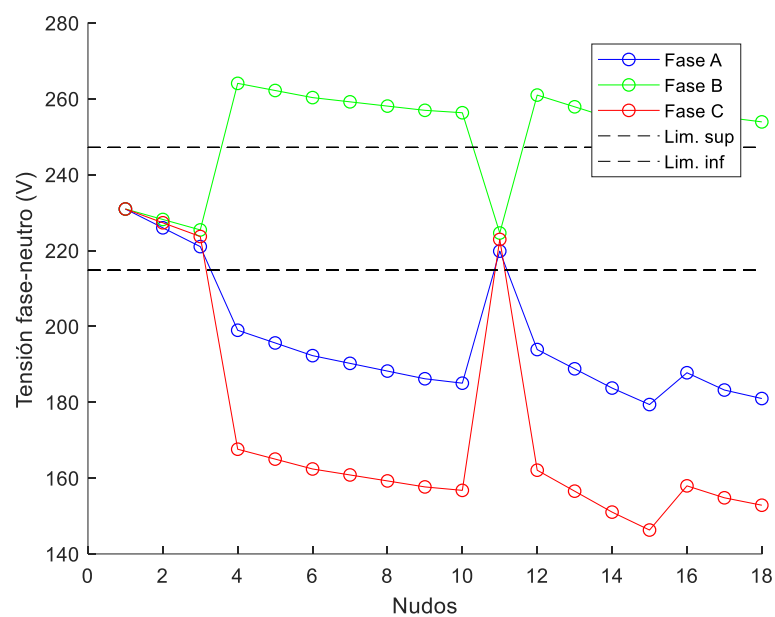


Figura 47: Perfil de tensiones fase-neutro por fases (Caso 7).

Resulta interesante señalar que los buses no afectados por la rotura, es decir, los buses 1, R2, R3 y R11 se encuentran dentro de los límites normativos, debido a una situación de equilibrio.

5.2.1.8 Caso 8: [36,32,32], $P = 1'7$, $R_g = 40$, Rotura rama 1

En el caso de que la rotura se produzca en cabecera de la red, se observa que ningún nudo presenta magnitudes dentro de los límites (Figura 48).

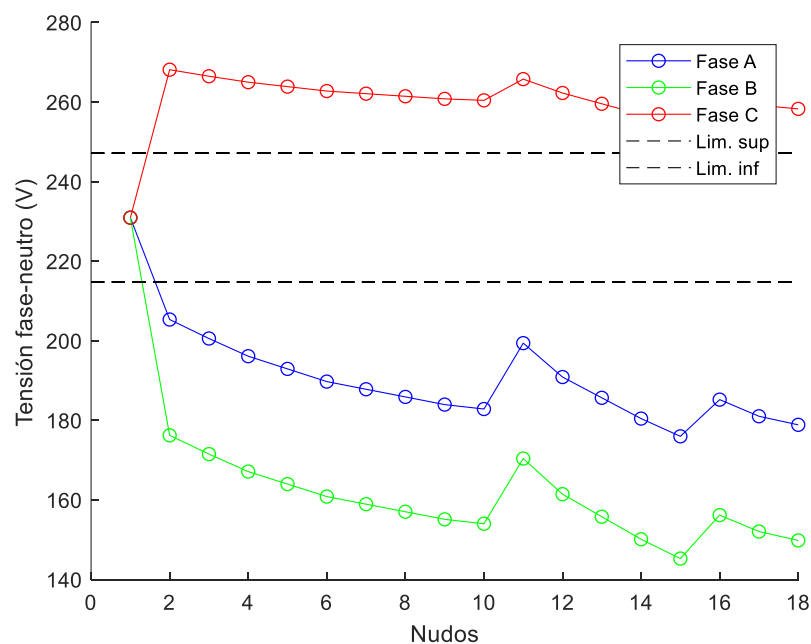


Figura 48: Perfil de tensiones fase-neutro por fases (Caso 8).

5.2.1.9 Caso 9: $[\frac{100}{3}, \frac{100}{3}, \frac{100}{3}]$, $P = 1$, $R_g = 0$, Rotura rama 1

Finalmente se vuelve a incidir en la importancia de una correcta ejecución y explotación de la red, es decir, mantener los parámetros de demanda de carga por cada fase lo más equilibrados posibles y una red de puesta a tierra cuyo valor sea el mínimo realizable. Como podemos apreciar en la Figura 49, este hecho permite mantener el fenómeno de la desestabilización de la red lo más desapercibido posible.

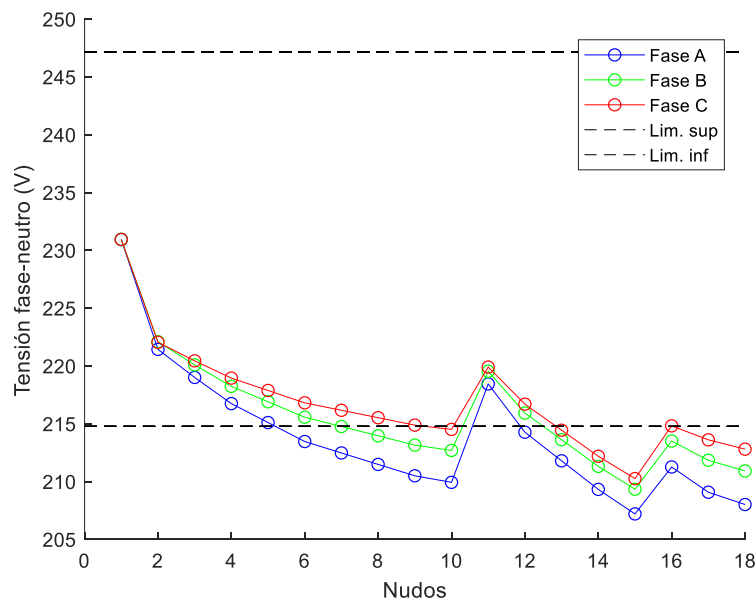


Figura 49: Perfil de tensiones fase-neutro por fases (Caso 9).

Sin embargo, esto puede llegar a ser incluso contraproducente, ya que el sistema se encuentra dentro de parámetros normales y podría pasar desapercibida la rotura.

De nuevo, tras el análisis de los casos presentados anteriormente, se pueden sacar una serie de conclusiones generales:

- Es posible apreciar la correlación existente entre un mayor desequilibrio de la carga y un aumento del desequilibrio en tensiones e intensidades de la carga afectada.
- De manera análoga, el desequilibrio de la red también es patente al aumentar la demanda de potencia por parte de la carga (mientras exista un desequilibrio de esta).
- En consonancia con el resto de datos obtenidos, se observa el efecto de una resistencia de puesta a tierra pequeña, pero no igual a cero, obteniendo desequilibrios de tensión e intensidad de mayor importancia que los que se obtienen para valores de R_g mayores.
- Finalmente, es necesario remarcar el efecto desestabilizador que tiene la rotura del neutro de la red para las cargas aguas abajo del tramo donde se produce la incidencia. Esto puede llegar a ser peligroso para la red en el caso de que se produzcan roturas cercanas a cabecera de la red.

5.2.2 Desequilibrios de tensión en las cargas adyacentes

Se procede a estudiar cómo afecta la rotura de una rama de la red al resto de nudos. Para ello, se volverán a plantear los casos expuestos anteriormente.

5.2.2.1 Caso 1: $[\frac{100}{3}, \frac{100}{3}, \frac{100}{3}]$, $P = 1$, $R_g = 0$, Rotura rama 17

Para analizar el desequilibrio existente cuando se produce la rotura, se utilizará la tensión neutro-tierra de cada nudo. Los resultados obtenidos para la red se pueden observar en la Figura 50.

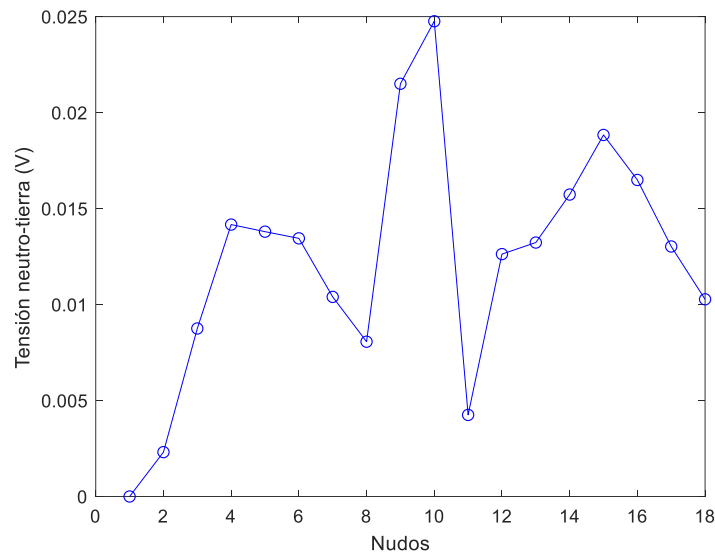


Figura 50: Perfil de tensión neutro-tierra para Caso 1.

Los valores de tensión neutro-tierra obtenidos para todos los nudos de la red resultan prácticamente nulos, lo cual nos hace ver la buena respuesta de la red a la rotura de neutro. El motivo ha sido anteriormente mencionado, la buena puesta a tierra y la bondad del equilibrio realizado.

5.2.2.2 Caso 2: $[36,32,32]$, $P = 1$, $R_g = 0$, Rotura rama 17

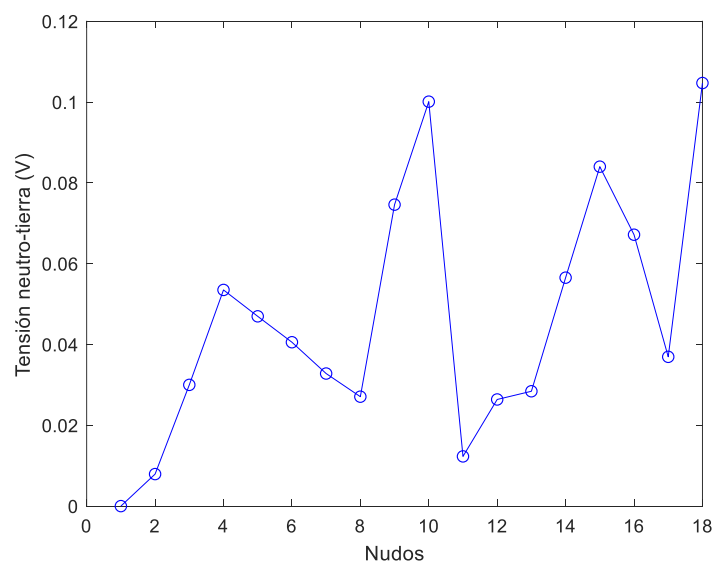


Figura 51: Perfil de tensión neutro-tierra para Caso 2.

En la Figura 51 se puede apreciar un ligero aumento de la tensión neutro-tierra, especialmente para el caso de la

rama afectada. Por tanto, se puede sentenciar que un aumento del desequilibrio de las cargas afecta negativamente a las cargas adyacentes a la carga donde se produce la rotura.

5.2.2.3 Caso 3: [36,32,32], $P = 1'7$, $R_g = 0$, Rotura rama 17

Una vez se conoce el efecto del desequilibrio de la carga en una red de mayor dimensión, se quiere validar si ocurre lo mismo al aumentar la demanda. Para ello, se aumenta el valor de todas las cargas. Los resultados aparecen en la Figura 52:

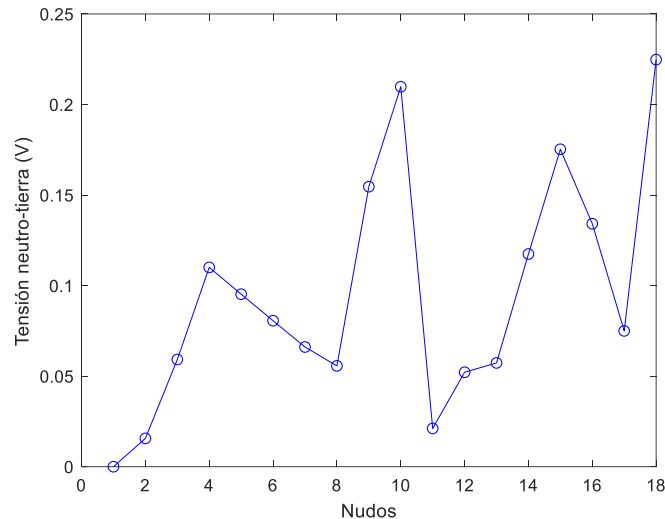


Figura 52: Perfil de tensión neutro-tierra para Caso 3.

Efectivamente, se aprecia la correlación existente entre la potencia demandada por las cargas y el aumento de tensión neutro-tierra de cada nudo.

5.2.2.4 Caso 4: [36,32,32], $P = 1'7$, $R_g = 2$, Rotura rama 17

En este caso, se quiere comprobar cómo afecta un aumento de la resistencia de puesta a tierra del sistema. Anteriormente se han alcanzado magnitudes cada vez más altas, pero debido a que la resistencia de puesta a tierra de las cargas era muy buena, estos valores siempre han oscilado cercanos a cero. Es por tanto que se requiere el desempeño de la red con una peor puesta a tierra.

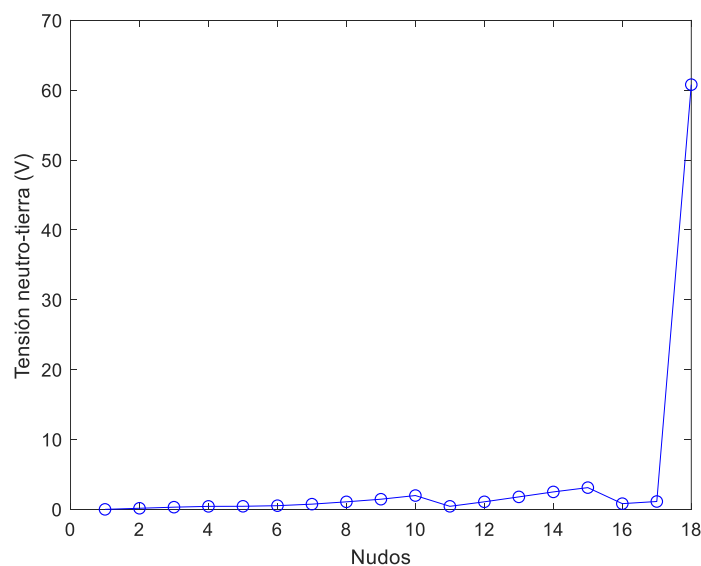


Figura 53: Perfil de tensión neutro-tierra para Caso 4.

Tal y como se observa en la Figura 53, debido al aumento de la resistencia se obtienen valores en general mayores para el resto de nudos no afectados por la rotura del neutro (aunque nunca valores por encima de los 5 V, límite recomendable). No es así en el caso de la carga afectada, donde el aumento de la tensión es significativo, y podría poner en peligro a los dispositivos monofásicos que se encuentren conectados a dicho nudo.

5.2.2.5 Caso 5: [36,32,32], $P = 1'7$, $R_g = 40$, Rotura rama 17

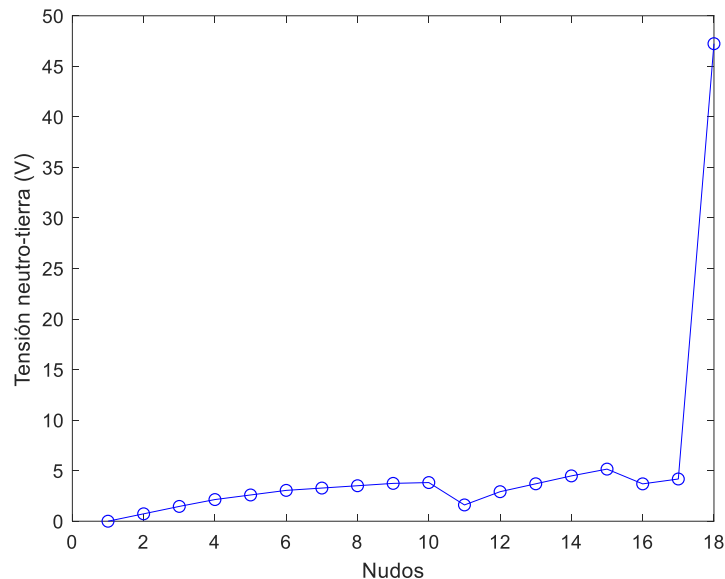


Figura 54: Perfil de tensión neutro-tierra para Caso 5.

En consonancia con el análisis de los datos para una red con dos cargas en paralelo, se observa que, para resistencias de puesta a tierra altas, se obtienen en la carga afectada valores menores de tensión neutro-tierra que para valores pequeños (Caso 4). Sin embargo, los nodos adyacentes sufren un aumento del desequilibrio. Esto también coincide con el análisis realizado a la red paralelo, donde para una configuración en la que la resistencia de puesta a tierra de la Carga 4 era alta, se obtenía una tensión neutro-tierra mayor en dicha carga.

5.2.2.6 Caso 6: [36,32,32], $P = 1'7$, $R_g = 40$, Rotura rama 7

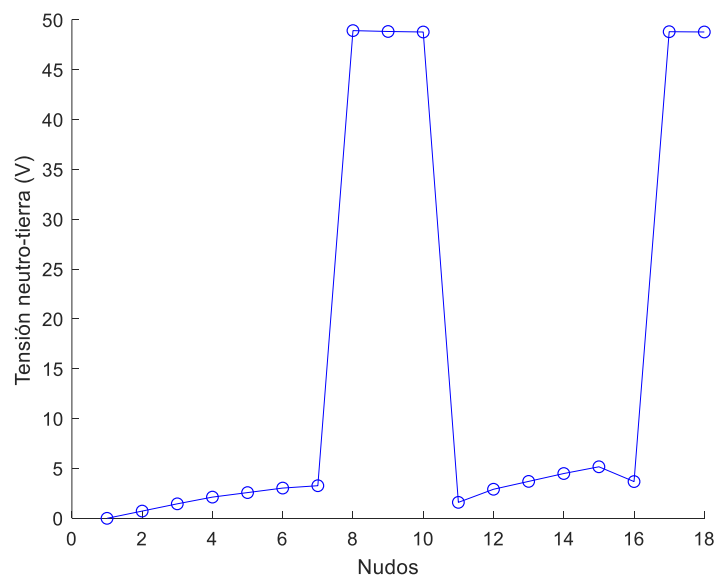


Figura 55: Perfil de tensión neutro-tierra para Caso 6.

En este caso, es posible comprobar el aumento del desequilibrio aguas abajo de la rama donde se produce la rotura. Los nodos R8, R9, R10, R17 y R18, aquellos que se encuentran tras dicha rotura, experimentan un aumento de la tensión de neutro de forma acusada, a diferencia del resto de nodos, los cuales se mantienen en valores normales.

5.2.2.7 Caso 7: [36,32,32], $P = 1'7$, $R_g = 40$, Rotura rama 3

La tensión neutro-tierra para cada bus se encuentra en forma de perfil de tensión en la Figura 56:

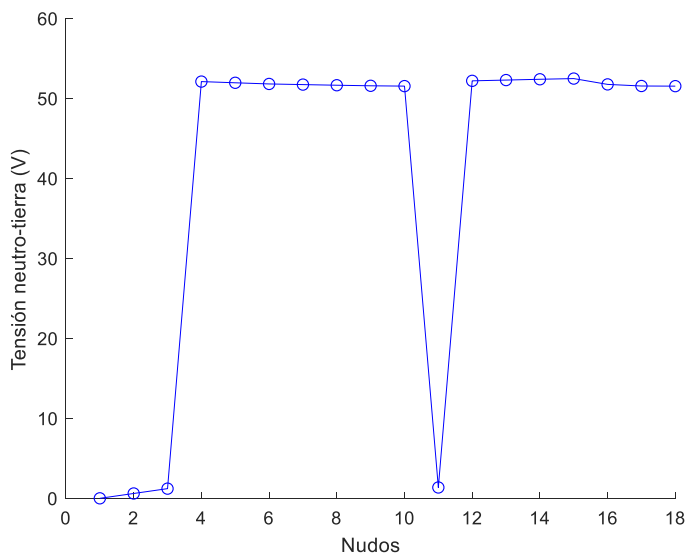


Figura 56: Perfil de tensión neutro-tierra para Caso 7.

Estudiando la figura es posible comprobar que se produce un aumento importante de la tensión neutro-tierra aguas abajo de la rotura. Resulta importante resaltar que se produce un aumento homogéneo en el resto de buses, de tal forma que los nudos cercanos a la rotura no se ven afectados en mayor medida que los más alejados.

5.2.2.8 Caso 8: [36,32,32], $P = 1'7$, $R_g = 40$, Rotura rama 1

En este caso se provocará la rotura en la rama que une el slack con la subred residencial, de tal forma que será posible comprobar si el desequilibrio (Figura 57) se extiende por todos los nudos.

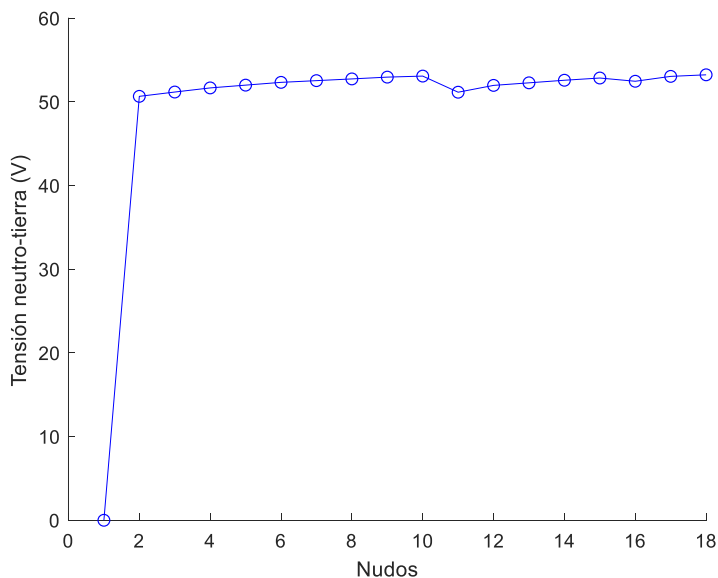


Figura 57: Perfil de tensión neutro-tierra para Caso 8.

En efecto, se obtienen unos valores en concordancia con la tesis planteada. Aparece un aumento significativo de la tensión neutro-tierra (el cual es un indicador de un desequilibrio fase-neutro bastante importante).

5.2.2.9 Caso 9: $[\frac{100}{3}, \frac{100}{3}, \frac{100}{3}]$, $P = 1$, $R_g = 0$, Rotura rama 1

Por último, una vez que se comprueba el efecto desestabilizador de la rotura cerca de cabecera, se quiere analizar si, con una red que se encuentre en buenas condiciones (equilibrada, resistencias de valor cuasi nulo), es posible paliar los efectos de una rotura en cabecera.

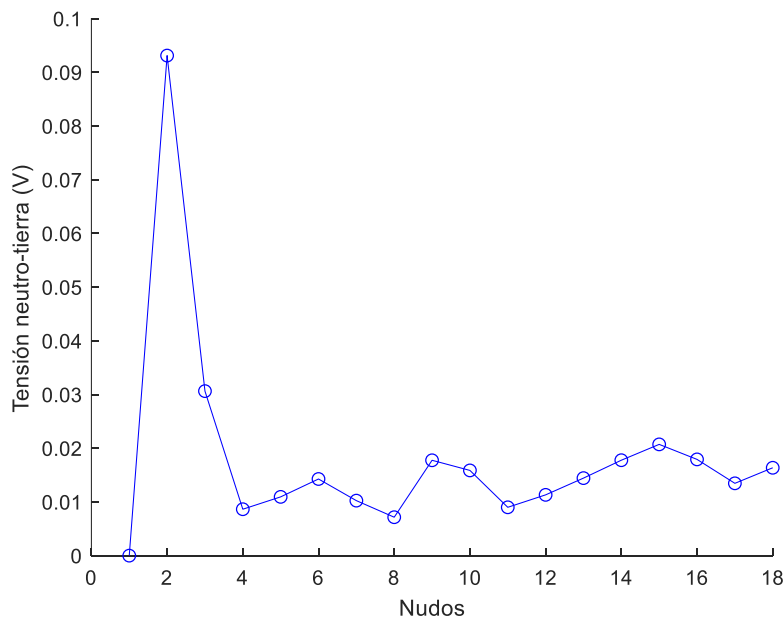


Figura 58: Perfil de tensión neutro-tierra para Caso 9.

En la Figura 58 es posible constatar la importancia de operar la red en las mejores condiciones de equilibrio posibles. Se obtienen valores prácticamente nulos de tensión neutro-tierra, con lo que las tensiones fase-neutro estarán dentro de la normalidad aun produciéndose una rotura en una zona crítica de la red (cercana a cabecera).

De todos las simulaciones y casos presentados anteriormente, se puede concluir lo siguiente:

- Al igual que en el caso simplificado de la red con cargas en paralelo, se vuelve a comprobar un aumento significativo de la tensión neutro-tierra para valores pequeños de R_g ($R_g \approx 2 \Omega$), siendo mayores que para el caso de $R_g = 40 \Omega$.
- El desequilibrio de las cargas también constituye un factor significativo en la mejora/empeoramiento del equilibrio de las tensiones e intensidades de los nudos de la red.
- De manera análoga, un aumento de demanda de las cargas propicia un aumento de la tensión neutro-tierra en los buses de la red.
- Finalmente, resulta importante remarcar el efecto desestabilizador aguas abajo de la rotura de neutro, pasando de obtener valores dentro de la normalidad ($<5 \text{ V}$) a valores que pueden llegar a comprometer el servicio de las cargas. Esto puede provocar que una rotura en ramas cercanas a cabecera de la red la desestabilice por completo. También se puede concluir que, aumentando la bondad de la red (mejor equilibrado de las cargas, buenas puestas a tierra, buen dimensionamiento de la red para evitar sobrecargas), se pueden obtener valores más razonables, no comprometiéndolo el desempeño de esta.

6 IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO DE ROTURA DE NEUTRO DEL CLIENTE

Una vez se ha analizado en profundidad la rotura del neutro en el lado de la red, resulta necesario continuar profundizando en el estudio. Para ello, se debe contemplar la posible rotura en otra zona del neutro (lado del cliente), la cual provoca efectos distintos a la rotura en el lado de la red. Resulta necesario realizar pequeñas modificaciones en el programa implantado para poder estudiar dicho fenómeno.

6.1 Modelo eléctrico de la rotura de neutro en la red del cliente

En este caso se vuelve a partir del programa original, puesto que se quiere representar la rotura de otra zona del neutro: el neutro de las cargas. Este fenómeno, diferente al que se producía en la parte de la red de distribución en baja tensión, puede observarse en la Figura 59:

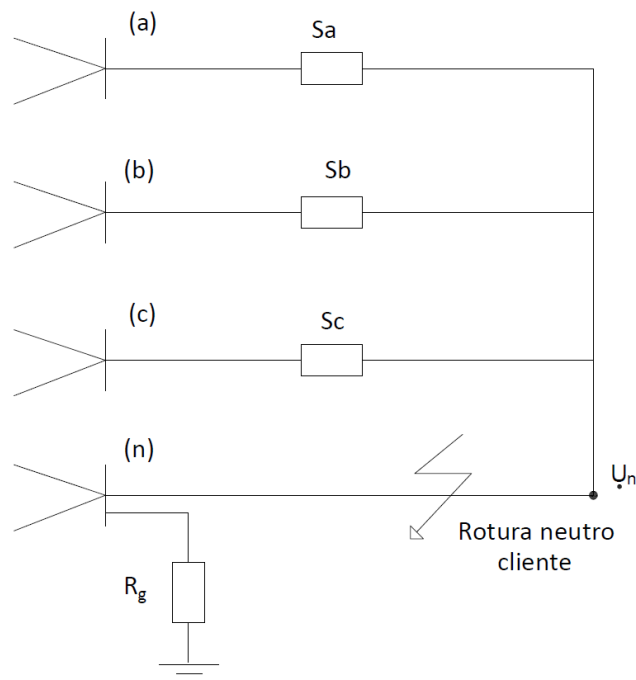


Figura 59: Rotura de neutro en el lado del cliente para un nudo genérico.

Este hecho requiere la modificación del programa. Por una parte, podría ser factible cambiar la formulación del algoritmo y adaptar las restricciones a dichas condiciones, tal que para el nudo afectado:

$$I_a + I_b + I_c = 0$$

$$I_f = \left(\frac{S_f}{U_f - U_n} \right)^*$$

Donde U_n es la nueva tensión del neutro de las cargas, distinta de U_n . Esto conllevaría la adición de la nueva variable U_n .

Sin embargo, es posible realizar un modelo de la red equivalente que expresa la misma situación que la anteriormente mencionada, pero sin la necesidad de modificar la programación de la herramienta.

Se puede observar en la Figura 60 la red equivalente a la mostrada en la Figura 56, de tal manera que se pueden modificar los datos de entrada del programa y no la formulación del problema.

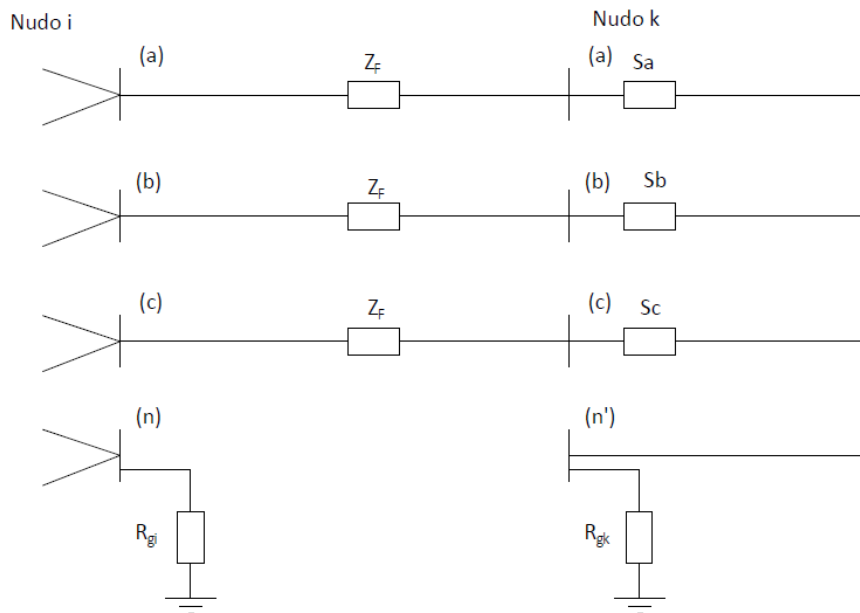


Figura 60: Modelo equivalente para rotura de neutro en el lado de cliente.

Será necesario implementar una nueva función que detecte cuándo se ha producido la rotura del neutro del cliente, y en qué nudo se ha producido dicha rotura. Una vez se detecta dicho nudo, se genera un nudo virtual (nudo i) a una distancia infinitésima del nudo original. La rama que une el nudo ficticio, sin carga, y el nudo donde se produce la rotura, tendrá una impedancia prácticamente nula ($Z_F \sim 10^{-4} \Omega$), y el neutro estará roto (situación estudiada en capítulos anteriores). El neutro de la carga se pondrá a tierra mediante una resistencia R_{gk} de valor muy alto (1000Ω), para simular que es un neutro flotante.

Así, la variable denominada anteriormente U_n se corresponderá con la tensión neutro-tierra U_n del nudo con carga.

Por tanto, queda patente que es necesario trabajar sobre los datos de entrada (creación de línea entre buses, creación de nuevo nudo ficticio con carga nula, puesta a tierra de valor elevado). En la Figura 61 se muestra el diagrama de flujo del programa con las adaptaciones oportunas que se han realizado.

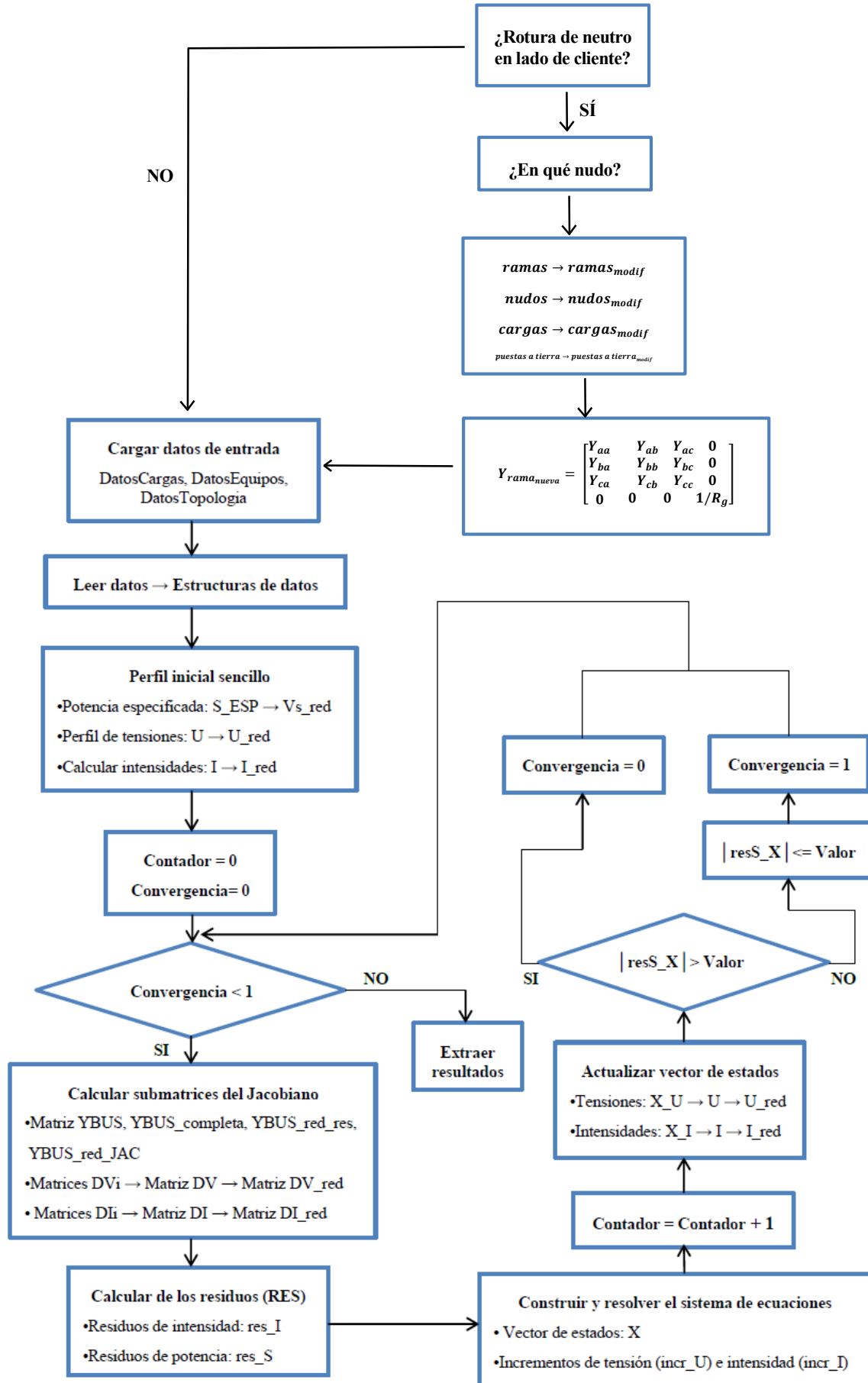


Figura 61: Diagrama de flujo del programa modificado para rotura de neutro en lado de cliente.

6.2 Múltiples soluciones

De nuevo, existe la necesidad de comprobar que las modificaciones realizadas sobre la estructura de datos se han realizado de manera adecuada. Para ello, se vuelve a programar una rutina en MATLAB a partir de la primera ley de Kirchhoff:

$$I_{\Sigma} = I_a + I_b + I_c = 0$$

En este caso, al considerarse que el neutro se encuentra flotante (no existe puesta a tierra o esta es de un valor muy elevado), y debido a la rotura del neutro entre el nodo ficticio y el nodo de la carga, se suprimen dichos términos de la expresión anterior.

Modificando la expresión como se realizó anteriormente:

$$I_{\Sigma} = \left(\frac{S_{an}}{U_n - U_a} \right)^* + \left(\frac{S_{bn}}{U_n - U_b} \right)^* + \left(\frac{S_{cn}}{U_n - U_c} \right)^* = 0$$

Se fijan los términos de potencia y de tensión por fase, y se parametrizan los términos real e imaginario de U_n . Para ello, se tomará un paso $p = 0,1$ V. El objetivo es estudiar todos los posibles escenarios y ver aquellos en los que se cumple la igualdad anteriormente planteada. Se compararán dichos resultados con los obtenidos en el programa.

Al igual que en la comprobación del modelo en capítulos anteriores, se ensayará una red simple formada por un generador y una carga, sin existencia de línea intermedia. Podemos ver dicha red en la Figura 62:

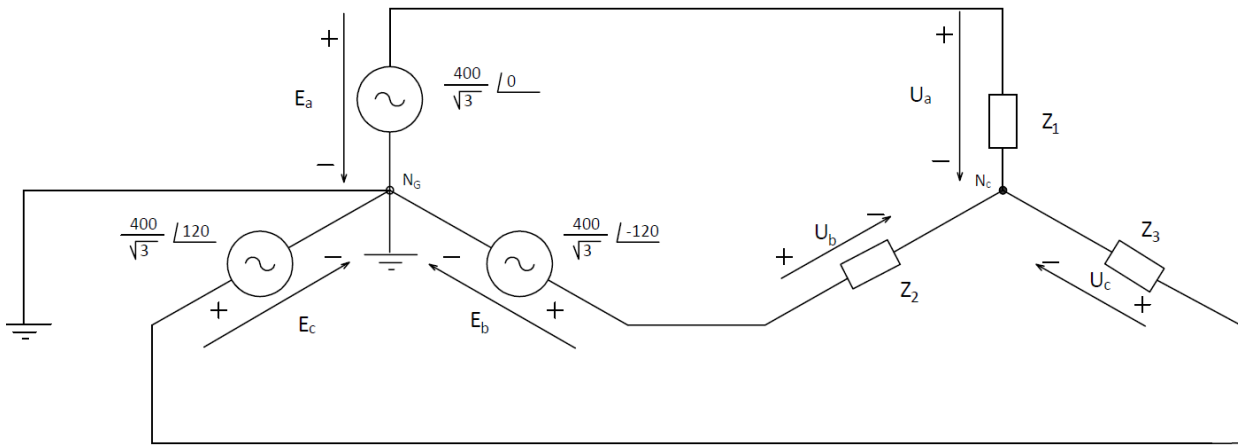


Figura 62: Red generador-carga sin puesta a tierra en la carga.

A continuación, en la Figura 63 se muestra la estructura tridimensional resultado de graficar las componentes real e imaginaria de U_n y la variable I_{Σ} . A diferencia del caso anterior, en este sólo existe un caso, al no existir puesta a tierra que se pueda modificar.

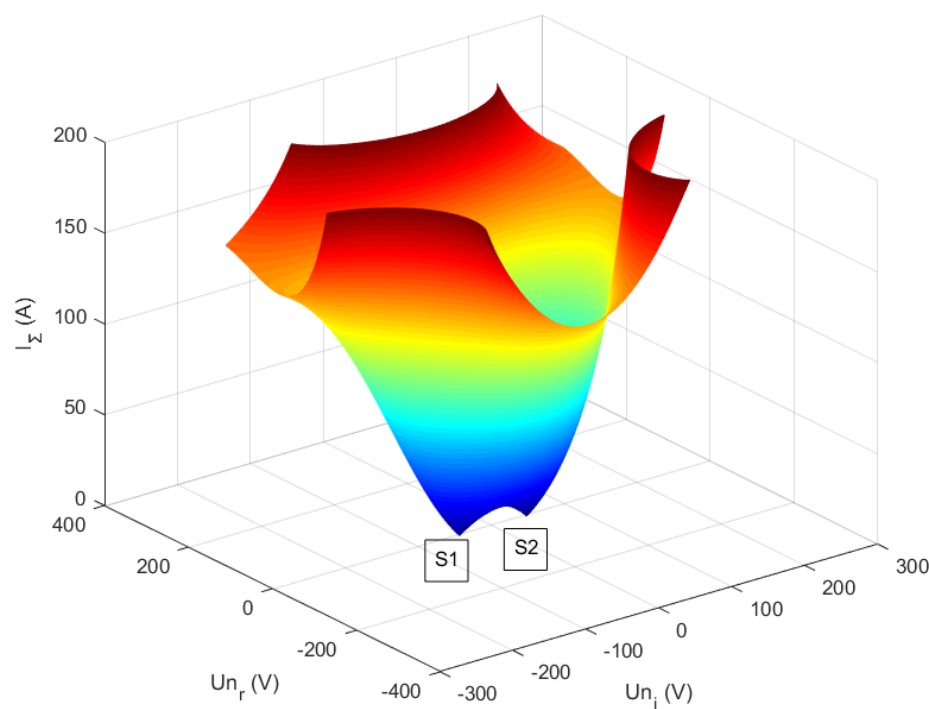


Figura 63: I_2 para rotura de neutro en el lado del cliente.

De nuevo, se alcanzan dos posibles soluciones. Se ensaya la misma red de la Figura 62 en la herramienta matemática y se recogen los datos que se pueden observar en la Tabla 12:

Tabla 12: Soluciones para rotura de neutro en el lado del cliente.

Solución	Valor solución U_n (V)	Valor solución programa U_n (V)
S1	$46,1737 \angle -95,7673^0$	$46,1882 \angle -95,7393^0$
S2	$46,1737 \angle 95,7673^0$	$46,1882 \angle 95,7393^0$

Se puede afirmar que el programa se encuentra correctamente implantado y se comprueba de nuevo la existencia de más de una solución debido a la naturaleza no lineal del problema.

7 ANÁLISIS DE RESULTADOS: ROTURA EN EL NEUTRO DEL CLIENTE

De nuevo, se vuelve a plantear el análisis de los resultados obtenidos al ensayar dos redes: la sencilla con solo tres tramos y dos cargas en paralelo, y la red de mayor tamaño de la CIGRE.

7.1 Red con cargas en paralelo

7.1.1 Nivel de desequilibrio sobre la carga afectada

Al igual que en el análisis realizado para la rotura del neutro en la parte de la red de distribución, se utilizará la misma línea formada por dos cargas en paralelo unidas a una bifurcación que se encuentra a 250 m de ellas, y un tramo común que se encuentra a 250 m del generador.

A su vez, se realizará la misma parametrización del sistema basada en el grado de desequilibrio de la carga afectada por la rotura del neutro en la parte del cliente, la potencia demandada por esta y la resistencias de puesta a tierra de los buses de la red. El esquema eléctrico de dicha red se ha mostrado con anterioridad en la Figura 29.

De nuevo, se contemplarán los cuatro escenarios de desequilibrio de carga entre fases y potencia demandada por las cargas descritos en el Capítulo V.

7.1.1.1 Caso 1: Desequilibrio de la carga [36,32,32], $P = 63 \text{ kW}$

La potencia de 63 kW se repartirá equitativamente entre ambas cargas, tanto la afectada como la adyacente. Como se ha comentado con anterioridad, en la Carga 3 se producirá un desequilibrio (en este caso, [36,32,32]), mientras que la adyacente se encuentra perfectamente equilibrada para no introducir factores que falseen los resultados, y así poder comprobar la influencia de la carga afectada sobre la carga en paralelo.

De nuevo, cuatro posibles configuraciones de la topología de la red serán estudiadas:

- $[0, 0, R_g, 0]$: Se trata de la configuración con mayor bondad, ya que se supone que tanto el punto donde se produce la bifurcación a las cargas, como la Carga 4, poseen una puesta a tierra rígida que permite un retorno a través de tierra de la corriente provocada por el desequilibrio de cargas.
- $[0, 0, R_g, \infty]$: En este caso, la puesta a tierra de la Carga 4 será inexistente, lo cual se modela con una R_g de un valor muy elevado.
- $[0, \infty, R_g, \infty]$: Se trata de la configuración más desfavorable, puesto que no existe puesta a tierra del neutro ni en la bifurcación, ni en la carga adyacente. Además, debido a que los valores más elevados de desequilibrio se producen con resistencias de puesta a tierra de bajo valor, el hecho de que se parametrize R_g permite explorar dicha posibilidad.
- $[0, \infty, \infty, R_g]$: En este caso, el desequilibrio alcanzado será menor, al imponer una resistencia de puesta a tierra elevada para la carga afectada (Carga 3).

Se requiere estudiar qué efectos tiene la rotura del neutro en la instalación del cliente sobre la propia carga afectada (Carga 3). Es por ello que se obtienen los datos de tensión neutro-tierra (U_n), medida del efecto desestabilizador del fenómeno. En Figura 64 se muestra el desequilibrio alcanzado para el Caso 1.

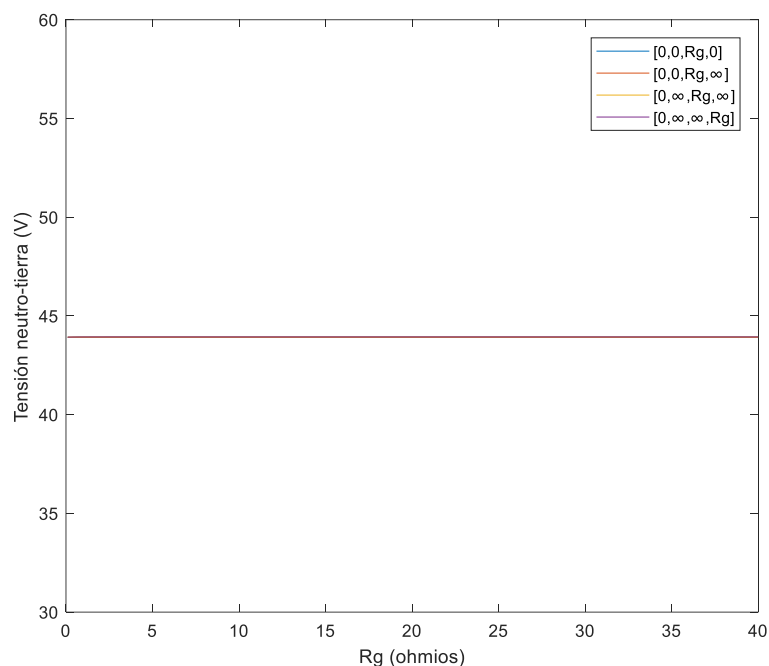


Figura 64: Tensión neutro-tierra de la carga afectada. Caso 1.

7.1.1.2 Caso 2: Desequilibrio de la carga [36,32,32], P = 126 kW

Como se puede comprobar en la Figura 65, parece no existir correlación entre un aumento de la resistencia de puesta a tierra de la carga afectada y el aumento de la tensión neutro-tierra (indicador del desequilibrio de tensiones e intensidades del sistema). Tampoco se aprecia un aumento debido a una mayor demanda de potencia.

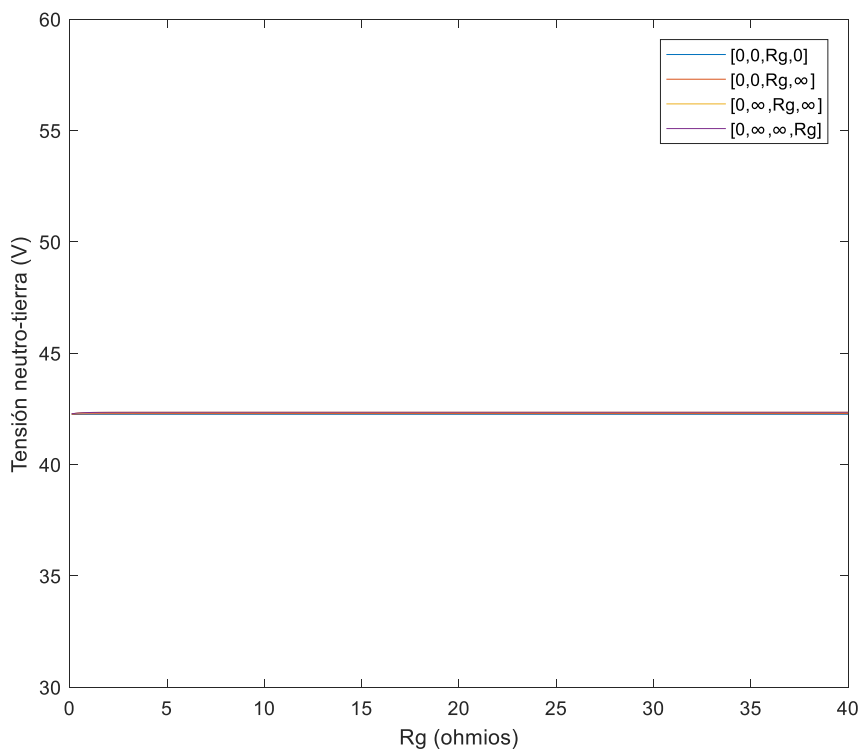


Figura 65: Tensión neutro-tierra de la carga afectada. Caso 2.

7.1.1.3 Caso 3: Desequilibrio de la carga [40,25,35], P = 63 kW

En la Figura 66 se observa el incremento de la tensión neutro-tierra debido al aumento del desequilibrio de las cargas. Resulta interesante remarcar el hecho de que, aún siendo un incremento de desequilibrio relativamente pequeño, el aumento de la tensión de neutro aumenta drásticamente.

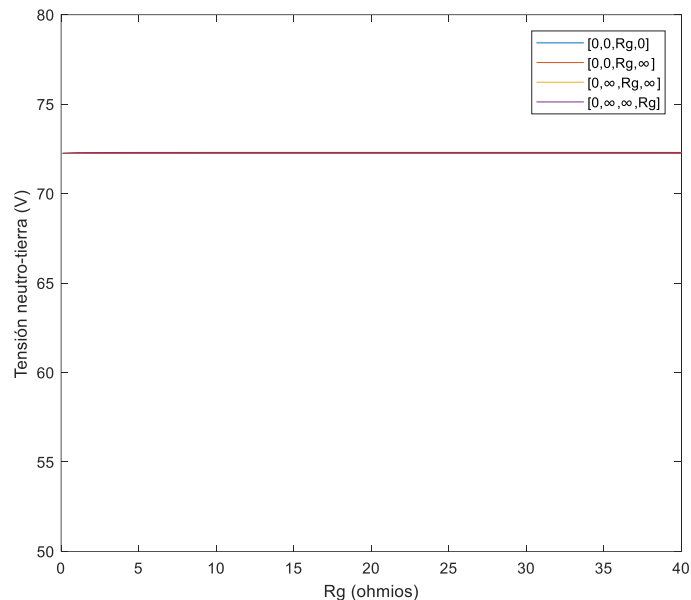


Figura 66: Tensión neutro-tierra de la carga afectada. Caso 3.

7.1.1.4 Caso 4: Desequilibrio de la carga [40,25,35], P = 126 kW

Los datos presentados en la Figura 67 corroboran la afirmación de que el aumento de demanda de las cargas no afecta prácticamente a la tensión de neutro. También puede comprobarse la poca influencia que posee la configuración adoptada por el sistema.

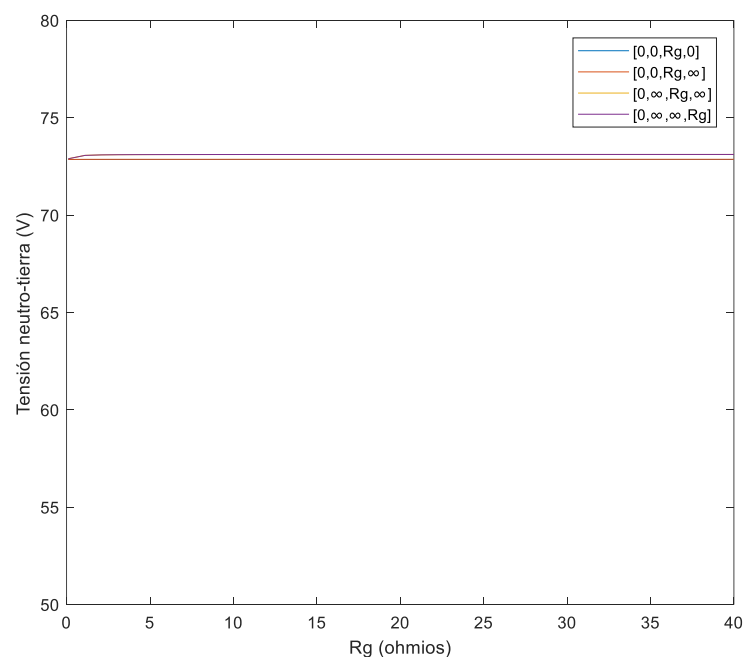


Figura 67: Tensión neutro-tierra de la carga afectada. Caso 4.

Se extraen una serie de conclusiones del estudio de las figuras anteriores:

- Podemos ver la nula influencia que posee la resistencia de puesta a tierra de la carga cuando se produce este tipo de rotura, siendo el parámetro U_n constante para cada R_g . Así mismo, comparando dos a dos los dos primeros casos, y los dos últimos, podemos sentenciar que la demanda de la carga no afecta significativamente para agravar el desequilibrio, pero una reparto desigual de potencia entre fases sí que tiene un efecto desfavorecedor.
- Finalmente, también resulta de interés comprobar que una rotura del neutro en el lado del cliente, a diferencia de la rotura en el lado de la red, tiene efectos perjudiciales sobre la propia carga alcanzando valores de tensión neutro-tierra elevados y no sobre las que se encuentran a su alrededor. Estos efectos sobre la propia carga no pueden evitarse mediante una correcta puesta a tierra de la carga afectada, o de las cargas colindantes.

A continuación, se estudia los valores máximos de tensión fase-neutro para cada fase. Se estudiarán dos de los cuatro escenarios, aquellos en los que se obtiene una desequilibrio de tensión neutro-tierra mayor y, por tanto, también se obtendrán valores fase-neutro más dispersos.

7.1.1.5 Caso 2: Desequilibrio de la carga [36,32,32], $P = 126 \text{ kW}$

Los resultados, constantes para todo R_g , se muestran en la Tabla 13. En este caso, se establece en la carga afectada una $R_g = 40 \Omega$.

Tabla 13: Diferencias porcentuales de las tensiones fase-neutro para neutro roto (Caso 2).

	Neutro Intacto	Neutro roto	Diferencia porcentual (%)
$U_a - U_n \text{ (V)}$	212,7252	216,8157	1,9229
$U_b - U_n \text{ (V)}$	215,7498	177,8030	-17,5883
$U_c - U_n \text{ (V)}$	215,1001	254,5715	18,3502
$U_n \text{ (V)}$	2,0569	42,3497	-

Se puede comprobar, comparando esta última tabla con la Tabla 4, que los desequilibrios fase-neutro en el caso de una rotura de neutro en el lado del cliente resulta menos dañina (en cuanto a desequilibrios) que la rotura del neutro de la red.

7.1.1.6 Caso 4: Desequilibrio de la carga [40,25,35], $P = 126 \text{ kW}$

Al igual que en el caso anterior, se aprecian desequilibrios en las tensiones entre fase y neutro, en este caso de mayor magnitud debido al mayor desequilibrio de potencia demandada por cada fase. Los resultados se pueden observar en la Tabla 14.

Tabla 14: Diferencias porcentuales de las tensiones fase-neutro para neutro roto (Caso 4).

	Neutro Intacto	Neutro roto	Diferencia porcentual (%)
$U_a - U_n \text{ (V)}$	211,0149	201,2212	-4,6412
$U_b - U_n \text{ (V)}$	219,9028	291,3068	32,4707
$U_c - U_n \text{ (V)}$	212,5660	169,3677	-20,3222
$U_n \text{ (V)}$	3,4236	73,0971	-

Al igual que en el caso anterior, se obtienen valores menos desequilibrados que los equivalentes para una rotura del neutro en el lado de la red.

7.1.2 Límites admisibles de desequilibrio de las cargas

De acuerdo con la normativa vigente [7] se estudiarán los límites de desequilibrios de carga por fases. Como se ha mencionado anteriormente, se trata de uno de los parámetros desestabilizadores de la red. Se recuerda que el intervalo admisible sería entre 214,774 V y 247,106 V para las tensiones fase-neutro.

Se fijará la demanda de carga total en 63 kW (31,5 kW por carga), debido a que cargas superiores provocan caídas de tensión en normal funcionamiento fuera de este rango. Se volverá a establecer un sistema con configuración $[0, \infty, R_g, \infty]$, por ser el más desfavorable. En este caso, al mantenerse constante la tensión neutro-tierra para toda R_g , no se estudiarán varios casos como se ha hecho en el análisis del Capítulo V. Los resultados pueden consultarse en la Tabla 15:

Tabla 15: Desequilibrios máximos admisibles para la normativa vigente.

$R_g (\Omega)$	Desequilibrio (%)
40	[33.45,33.15,33.4]

Como se comprueba, al no poder compensar la rotura del neutro con una buena puesta a tierra (caso que sí es posible para la rotura del neutro de la red), el intervalo de grados de desequilibrio factibles resulta muy reducido, prácticamente las cargas han de estar equilibradas perfectamente para no incumplir con las disposiciones jurídicas.

7.1.3 Límites admisibles de resistencias de puesta a tierra

Analizando gráficas anteriores, se ha podido comprobar que la tensión neutro-tierra (y, consecuentemente, la tensión fase-neutro) no es dependiente del valor de resistencia de puesta a tierra del sistema. En efecto, no existe ningún límite de resistencia de puesta a tierra a partir del cual se incumpla la normativa. Por tanto, no resulta significativo, en este caso, analizar dicho fenómeno.

7.1.4 Influencia de la rotura sobre las cargas adyacentes

Se graficará otra vez la tensión neutro-tierra (U_n) respecto a R_g . Como se puede comprobar, parece no existir correlación entre un aumento de la resistencia de puesta a tierra de la carga afectada y el aumento de la tensión neutro-tierra (indicador del desequilibrio de tensiones e intensidades) en la carga adyacente (Carga 4). El orden de dicha magnitud es prácticamente despreciable.

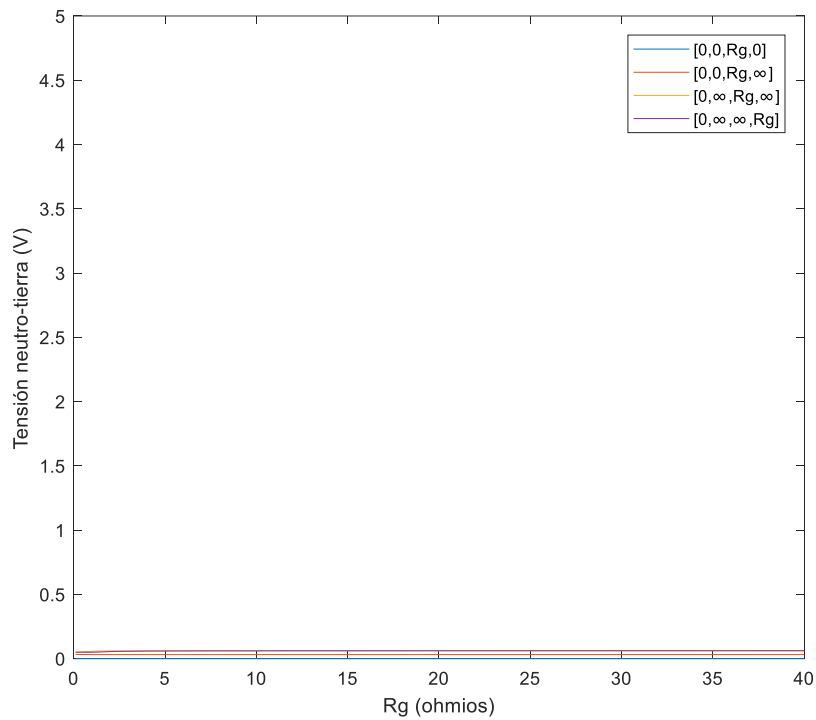


Figura 68: Tensión neutro-tierra de la carga adyacente. Caso 1.

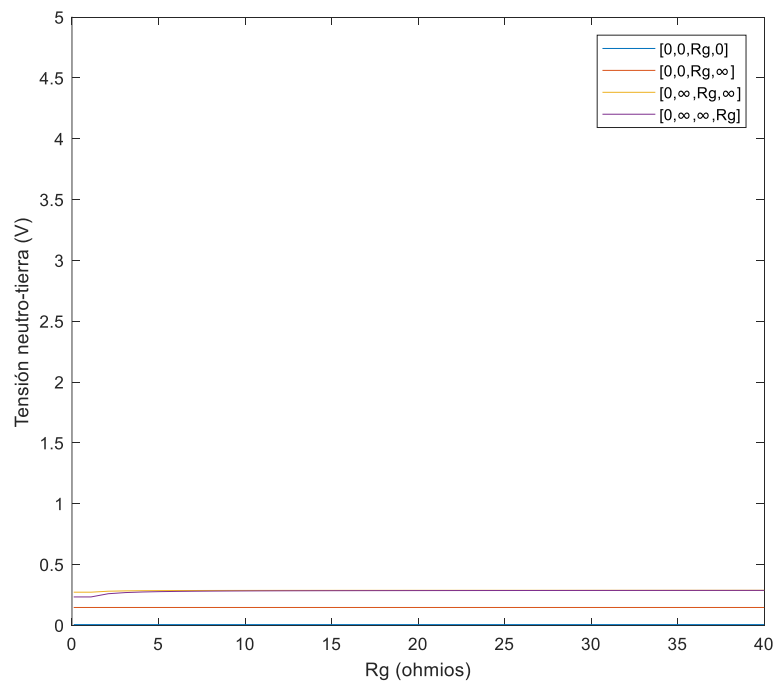


Figura 69: Tensión neutro-tierra de la carga adyacente. Caso 2.

Tal y como se aprecia en la Figura 69, la tensión neutro-tierra sigue siendo muy pequeña, aunque empieza a distinguirse la influencia de la configuración adoptada y del aumento de la demanda de las cargas. Para escenarios donde no existe puesta a tierra de la Carga 4 y en el tramo común, se obtienen valores mayores que aquellos donde existe una buena red de tierras.

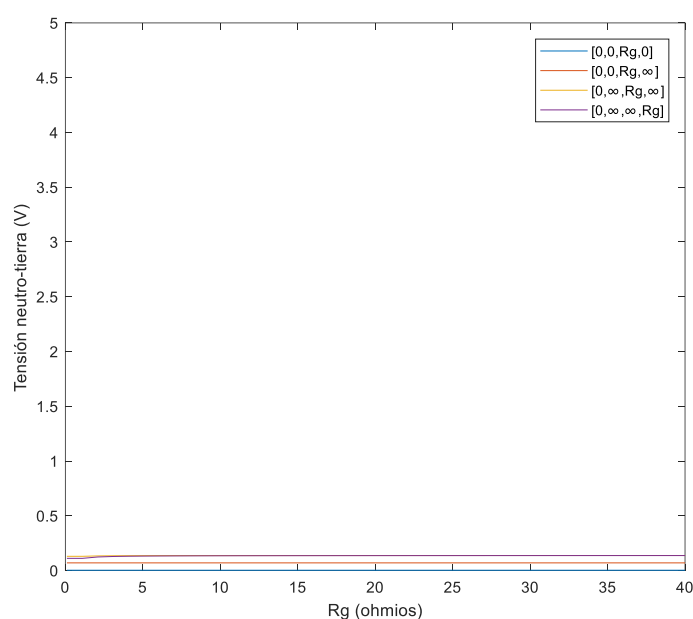


Figura 70: Tensión neutro-tierra de la carga adyacente. Caso 3.

Se comprueba en este caso la influencia del desequilibrio de carga entre fases, aumentándolo.

De nuevo, se considera despreciable la tensión neutro-tierra, pero vuelve a demostrarse que los valores más altos (dentro de encontrarse en los límites recomendables) se obtienen para configuraciones de puesta a tierra en los que no existe esta, o bien se materializa mediante resistencias de alto valor.

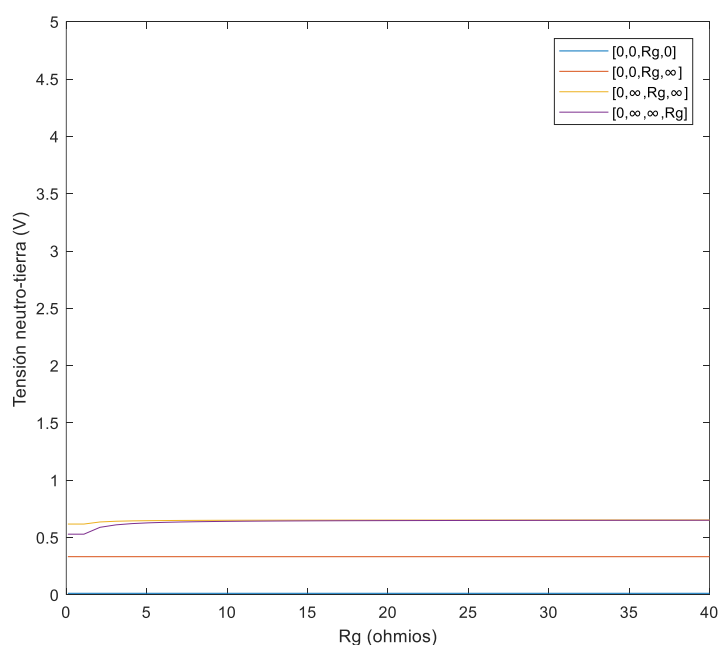


Figura 71: Tensión neutro-tierra de la carga adyacente. Caso 4.

En el último caso (Figura 71), donde se hace conjunción de una alta demanda y un desequilibrio mayor, se hace más notoria la diferencia de configuraciones de puesta a tierra. También se observa un aumento significativo respecto al primer caso, lo cual confirma la influencia de demanda y desequilibrio de cargas sobre la tensión neutro-tierra de la carga adyacente. Sin embargo, se puede sentenciar que la rotura del neutro de la carga afectada (Carga 3) no afecta a la carga adyacente (Carga 4).

Del estudio de estos cuatro casos se pueden sacar una serie de conclusiones:

- No hay influencia del valor de resistencia de puesta a tierra (R_g) de la carga afectada sobre la carga adyacente, sin embargo, sí que hay cierta relación (mínima) con la configuración de puesta a tierra adoptada.
- El grado de demanda de las cargas y el desequilibrio entre fases también tiene cierto grado de influencia con los valores alcanzados por la tensión neutro-tierra.
- Sin embargo, se puede sentenciar que la influencia de la rotura de neutro del cliente sobre cargas adyacentes es muy limitada.

7.2 Red residencial CIGRE

Una vez que se ha analizado una red simple formada por un generador y dos cargas en paralelo, se procede otra vez al estudio cualitativo de la red de tipo residencial propuesta por el CIGRE (Figura 40).

7.2.1 Desequilibrios de tensión en las cargas

De nuevo, se ha realizado una parametrización del sistema, de tal manera que pueden variar diversas magnitudes:

- Grado de desequilibrio en la carga ([%Sa, %Sb, %Sc])
- Potencia demandada por las cargas
- Carga en la que se produce la rotura del neutro en el lado del cliente

En este caso, se ha optado por fijar la resistencia de puesta a tierra de las cargas a 40Ω al comprobar en el epígrafe anterior la escasa influencia de este parámetro sobre los datos obtenidos. Se probará un caso en el que las resistencias de puesta a tierra de las cargas adyacentes sean pequeñas, para comprobar el efecto sobre dichas cargas colindantes. De igual manera, la potencia demandada se modulará de manera uniforme para todas las cargas mediante un parámetro P partiendo de los valores establecidos por el CIGRE [8], y el desequilibrio adoptado por todas las cargas será el mismo.

Se continuará utilizando la misma nomenclatura en el programa, distinta de la que aparece en el documento del CIGRE. Para consultar dicha equivalencia, consultar Tabla 10 y Tabla 11.

Se pretende conocer la tensión fase-neutro. Esto se debe a que las cargas monofásicas que se encuentren conectadas entre una de las fases y el neutro se verán sometidas a dicha tensión y, si el valor de la tensión neutro-tierra resulta alto, puede provocar desequilibrios de gran importancia en cada una de las fases, produciéndose fenómenos de subtenensión y sobretensión.

Se volverán a distinguir nueve posibles casos, variando los parámetros anteriormente mencionados.

7.2.1.1 Caso 1: [33'3,33'3,33'3], P = 1, Rotura carga 18

Las cargas se encuentran perfectamente equilibradas en este primer caso. También se mantiene una red bien dimensionada, donde la demanda de las cargas no provoca una sobrecarga esta. La rotura se produce en la carga situada en el extremo aguas abajo de la red.

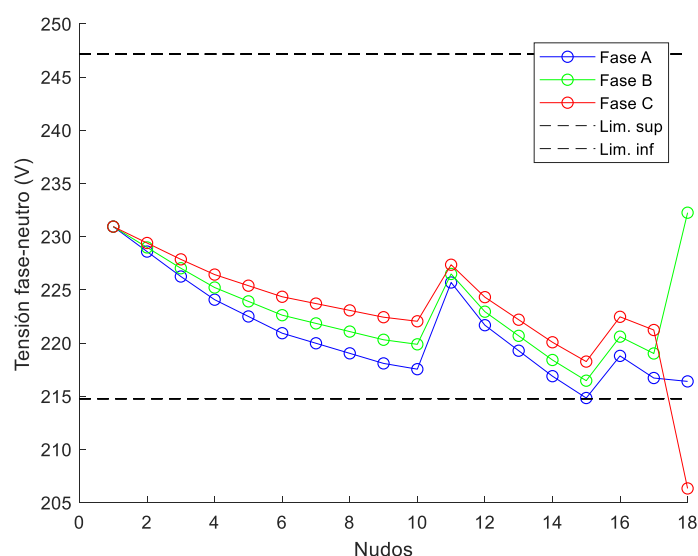


Figura 72: Perfil de tensiones fase-neutro por fases (Caso 1).

Se observa que solo se superan los límites establecidos para el bus afectado por la rotura del neutro (Figura 72). El resto, permanecen dentro de los límites admisibles.

7.2.1.2 Caso 2: [33'3,33'3,33'3], P = 1'7, Rotura carga 18

Se procederá a aumentar la demanda de carga en la red (aumentando el parámetro P) para comprobar si esto afecta al desequilibrio de tensiones e intensidades en las cargas.

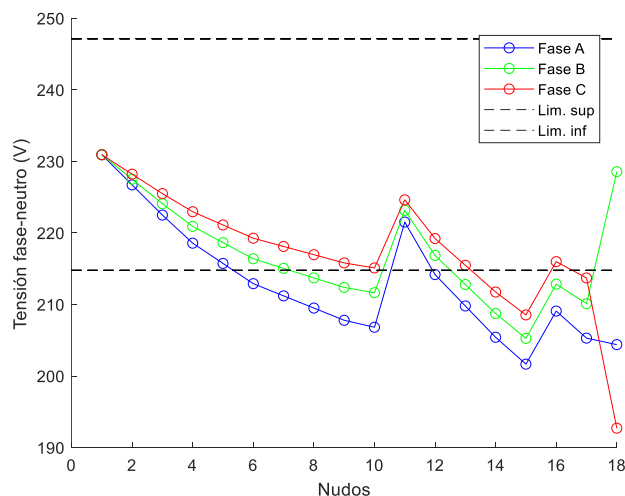


Figura 73: Perfil de tensiones fase-neutro por fases (Caso 2).

El aumento de la demanda de las cargas provoca la aparición de una subtensión generalizada en los buses (Figura 73), pero se puede comprobar que dicha disminución es proporcional para las tres fases. No obstante, en el bus afectado sí que se produce un desequilibrio evidente, con dos fases donde se produce subtensión. Aunque no se encuentre dentro del alcance del documento, muestra la necesidad de un correcto dimensionamiento de la red para que no se produzca este tipo de fenómenos.

7.2.1.3 Caso 3: [36,32,32], P = 1'7, Rotura carga 18

Se ha podido observar en el caso anterior la correlación entre potencia demandada por las cargas y desequilibrio en la red. Se quiere comprobar si esto mismo ocurre cuando aumenta el desequilibrio de las cargas. Para ello, aumentaremos ligeramente el desequilibrio hasta una situación factible. Los resultados de la tensión fase-neutro se pueden apreciar en la Figura 74.

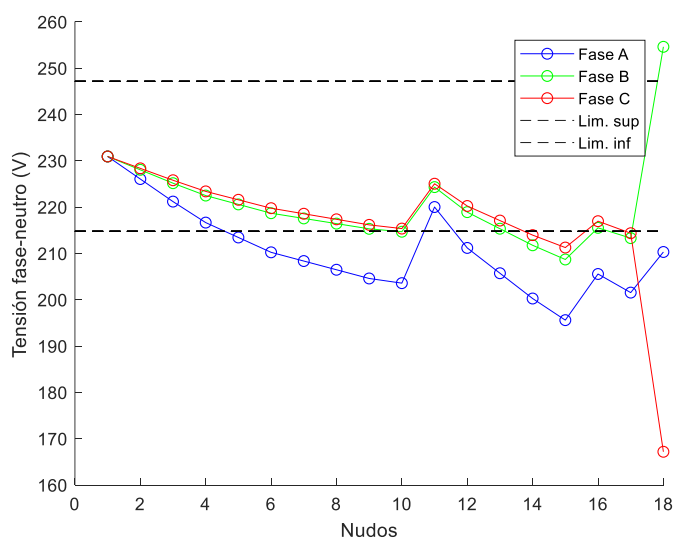


Figura 74: Perfil de tensiones fase-neutro por fases (Caso 3).

De nuevo, queda constatado la importancia de un buen equilibrado de la red. Se comprueba que el aumento del desequilibrio de demanda de carga por cada fase provoca la aparición de una desestabilización de la red respecto

a casos anteriores. En especial, la carga afectada por la rotura se somete al fenómeno de subtensión en las fases A y C, y sobretensión en el caso de la fase B.

7.2.1.4 Caso 4: [40,25,35], $P = 1,7$, Rotura carga 18

El aumento del desequilibrio de las cargas, provoca que se generen unos valores de tensión fase-neutro en la carga afectada muy dispares. También empieza a ser patente el aumento de la tensión neutro-tierra del resto de nodos no afectados que, si bien no es muy pronunciada, sí que comienza a provocar desequilibrios en el resto de las cargas. En la Figura 75 se muestra el perfil de tensiones fase-neutro de la red.

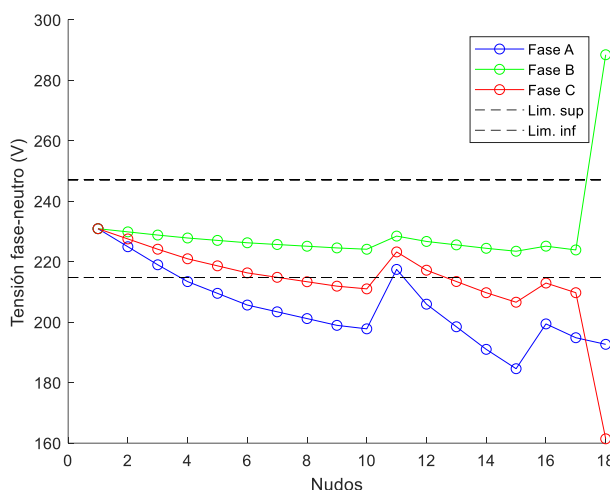


Figura 75: Perfil de tensiones fase-neutro por fases (Caso 4).

7.2.1.5 Caso 5: [36,32,32], $P = 1,7$, Rotura carga 17

Volvemos a una situación de desequilibrio de la red más realista, pero mantenemos el parámetro $P = 1,7$ debido a que permite aumentar el efecto desestabilizador de la rotura, pudiéndose apreciar más fácilmente. En este caso, se quiere investigar si, provocando la rotura en cargas que se encuentran más cercanas a cabecera de la red se obtienen valores dispares aguas abajo de la rotura, fenómeno observado en la rotura del neutro en el lado de la red.

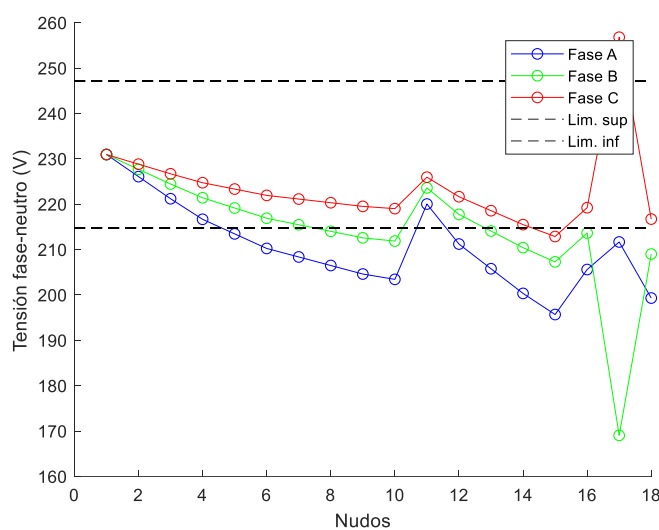


Figura 76: Perfil de tensiones fase-neutro por fases (Caso 5).

Se reduce el desequilibrio de las cargas y se provoca el corte del neutro en una carga situada más cerca de

cabecera. Como se puede comprobar en la Figura 76, se traslada el desequilibrio al bus afectado, quedando ahora el nudo R18 con valores mucho menos dispersos.

7.2.1.6 Caso 6: [36,32,32], $P = 1'7$, Rotura carga 16

Se comprueba de nuevo en la Figura 77 el desplazamiento del desequilibrio al bus R16, afectado en este caso por la rotura.

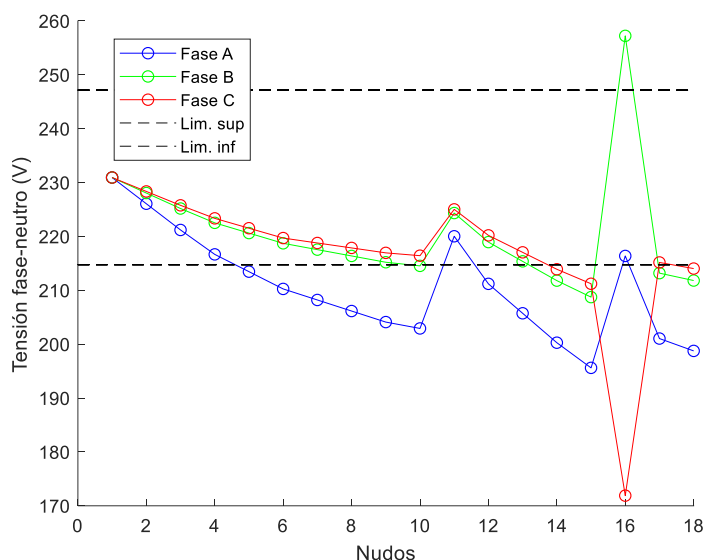


Figura 77: Perfil de tensiones fase-neutro por fases (Caso 6).

7.2.1.7 Caso 7: [36,32,32], $P = 1'7$, Rotura carga 15

Es necesario comprobar si la tendencia de que la rotura desequilibra solo las tensiones e intensidades en la propia carga afectada resulta cierta. Para ello, se provoca la rotura del neutro en la carga 15. Se puede observar en la Figura 78 cómo se desplaza de nuevo el desequilibrio al nudo R15.

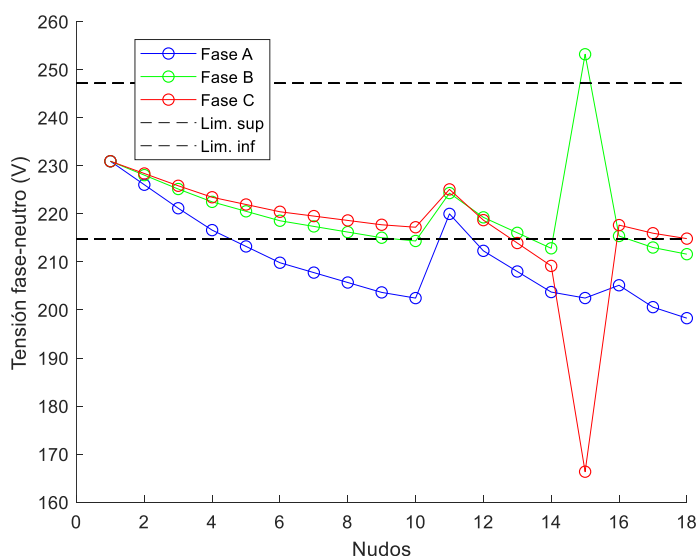


Figura 78: Perfil de tensiones fase-neutro por fases (Caso 7).

7.2.1.8 Caso 8: [36,32,32], $P = 1'7$, Rotura carga 11

El penúltimo caso que se ensaya es la rotura del nudo R11, el más cercano a cabecera (aunque se ha comprobado

que no existe relación entre el punto de rotura y el desequilibrio aguas abajo de la red). Es apreciable en la Figura 79 que el resto de buses también se ven ligeramente afectados por una tensión U_n relativamente elevada, aunque dentro de la recomendación.

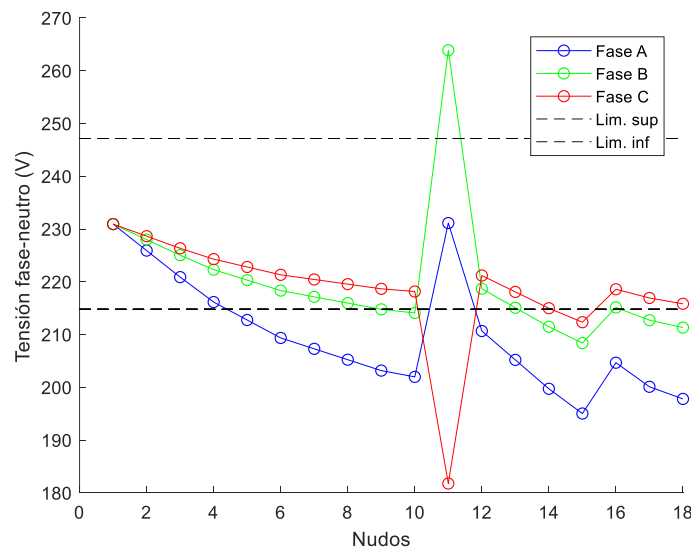


Figura 79: Perfil de tensiones fase-neutro por fases (Caso 8).

7.2.1.9 Caso 9: [36,32,32], $P = 1'7$, Rotura carga 11, $R_g = 0 \Omega$

Finalmente, el último caso que se pretende estudiar es aquel en el que todas las cargas poseen una buena puesta a tierra. El objetivo de este caso es ver si es posible mitigar el efecto de una tensión neutro-tierra que, aun no siendo de elevado valor, sí que genera cierto desequilibrio en las cargas adyacentes a la carga afectada.

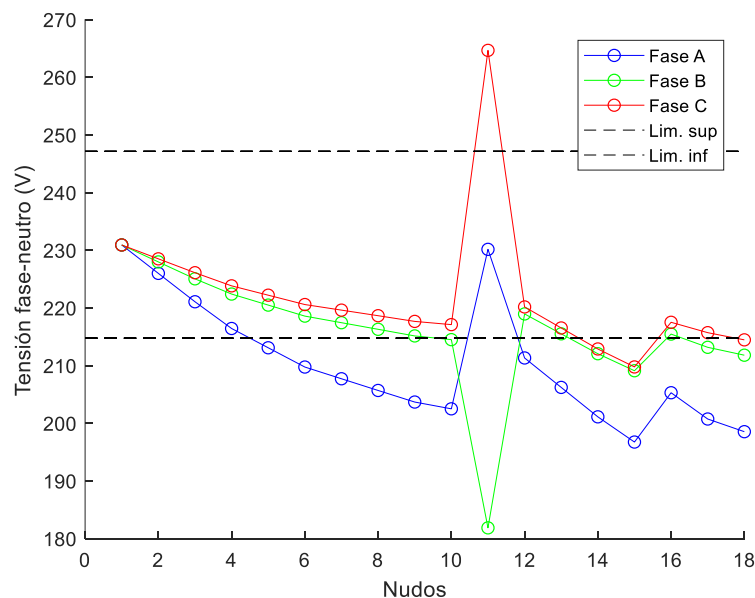


Figura 80: Perfil de tensiones fase-neutro por fases (Caso 9).

En efecto, como se ve en la Figura 80, el valor de las tensiones fase-neutro del resto de buses que no se ven afectados mejora respecto a los casos anteriores, donde se ha establecido una $R_g = 40 \Omega$ para todas las puestas a tierra.

Finalmente, a modo de resumen de todos los casos ensayados en el epígrafe actual, se llega a una serie de conclusiones:

- El valor de la resistencia de puesta a tierra de la carga afectada no guarda relación alguna con la tensión de neutro alcanzada, sin embargo, una buena puesta a tierra (con valores cercanos a cero) sí que puede favorecer a que el desequilibrio de tensiones e intensidades en las cargas adyacentes no sea tan pronunciado.
- Se vuelve a obtener una correlación importante entre el desequilibrio en tensiones e intensidades, demanda de las cargas y grado de desequilibrio de éstas.
- A diferencia de la rotura anterior, en el estudio de la rotura del neutro en la parte del cliente es posible afirmar que no hay un alto grado de influencia sobre las cargas colindantes a la afectada.

7.2.2 Influencia de la rotura sobre cargas adyacentes

Al igual que en el epígrafe anterior, se traslada el estudio a las cargas adyacentes. Para observar de manera más clara cómo interacciona la rotura de neutro en el lado del cliente con el resto de cargas y buses, se utilizará la tensión neutro-tierra.

7.2.2.1 Caso 1: [33'3,33'3,33'3], P = 1, Rotura carga 18

Para analizar el desequilibrio existente cuando se produce la rotura, se utilizará la tensión neutro-tierra de cada nudo. Los resultados obtenidos para la red se pueden observar en la Figura 81.

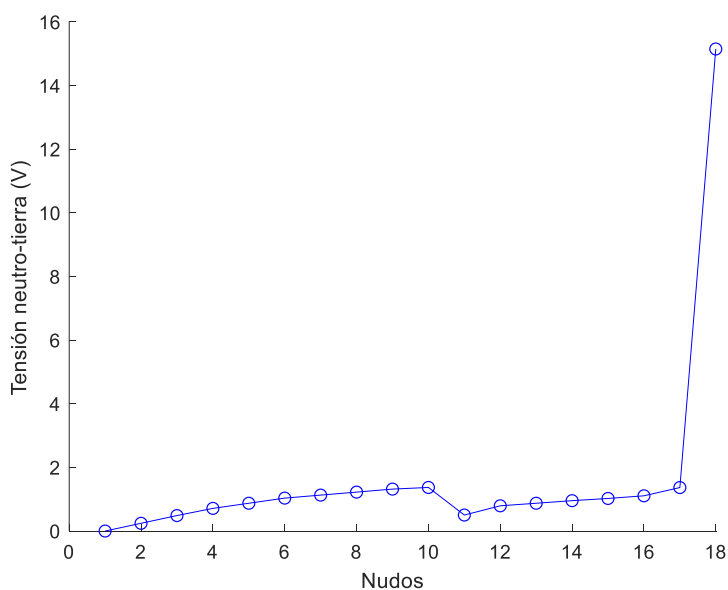


Figura 81: Perfil de tensión neutro-tierra para Caso 1.

Los valores de tensión neutro-tierra obtenidos para todos los nudos de la red resultan despreciables respecto al valor del neutro de la carga afectada, pero se aprecia que son de cierta magnitud, más alta que cuando la rotura se producía aguas abajo en el lado de la red.

7.2.2.2 Caso 2: [33'3,33'3,33'3], P = 1'7, Rotura carga 18

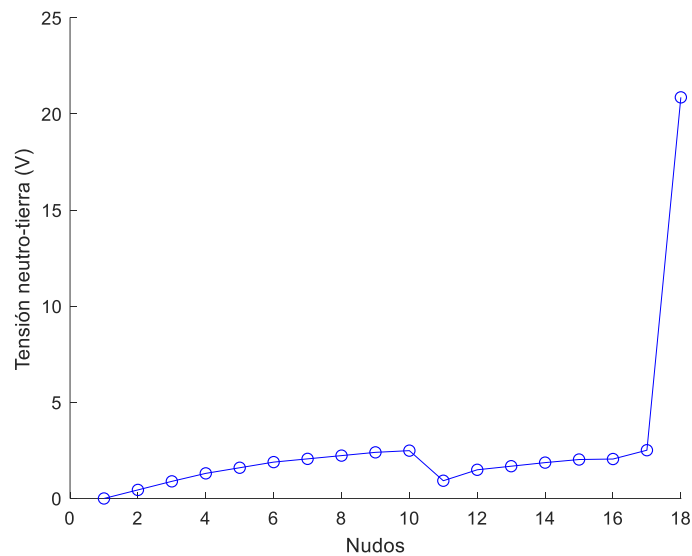


Figura 82: Perfil de tensión neutro-tierra para Caso 2.

En la Figura 82 se aprecia el aumento de la tensión neutro-tierra, especialmente para el caso de la rama afectada. Por tanto, se puede sentenciar que un aumento de la potencia demandada por las cargas afecta negativamente tanto a las cargas adyacentes como a la propia carga donde se produce la rotura.

7.2.2.3 Caso 3: [36,32,32], P = 1'7, Rotura carga 18

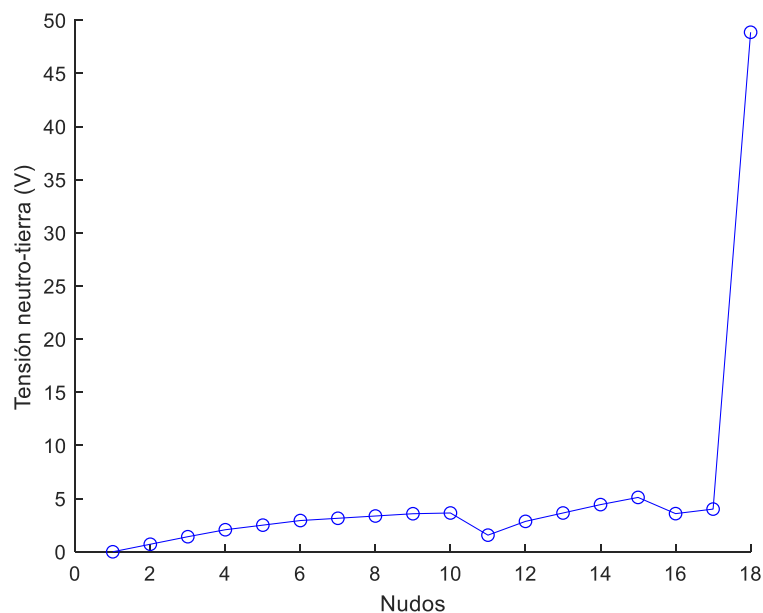


Figura 83: Perfil de tensión neutro-tierra para Caso 3.

Se aprecia la correlación existente entre el desequilibrio de carga por cada fase y el aumento de tensión neutro-tierra de cada nudo (Figura 83). Los valores comienzan a aproximarse al límite recomendable (< 5 V).

7.2.2.4 Caso 4: [40,25,35], P = 1'7, Rotura carga 18

En este caso, se procura aumentar de manera apreciable el desequilibrio de carga entre fases a un escenario no

muy realista, pero factible. El objetivo es comprobar si este aumento de tensión neutro-tierra de cada bus es mantenido, o bien se estabiliza.

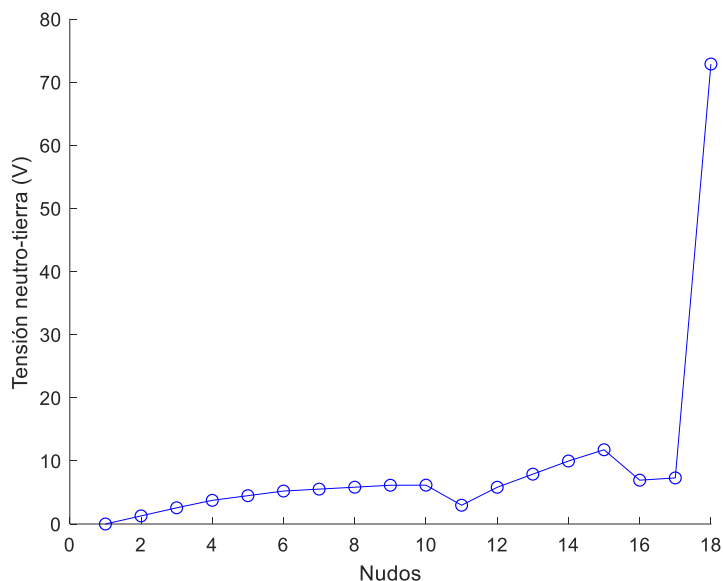


Figura 84: Perfil de tensión neutro-tierra para Caso 4.

Tal y como se observa en la Figura 84, es apreciable el aumento significativo de la tensión neutro-tierra para todos los buses de la red, por encima de límites recomendados. Además, sobre la propia carga afectada, se obtienen valores elevados, que ponen en riesgo la instalación si las cargas son monofásicas.

7.2.2.5 Caso 5: [36,32,32], P = 1'7, Rotura carga 17

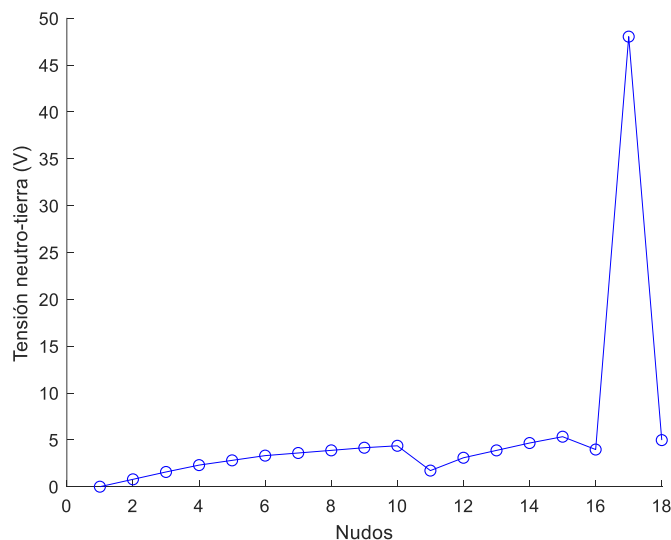


Figura 85: Perfil de tensión neutro-tierra para Caso 5.

En la Figura 85 se confirma que la rotura en una carga afecta a dicha carga, y de manera mucho menos evidente (y, por tanto, con valores mucho más reducidos) a las cargas adyacentes. Se confirma la diferencia entre la rotura que se provoca en el lado de la red, y la rotura que se produce en el lado del cliente.

7.2.2.6 Caso 6: [36,32,32], P = 1'7, Rotura carga 16

En este caso, se pretende simular que la rotura de neutro se produce algo más arriba en la red, de tal manera que se pueda analizar qué sucede en los nodos agua debajo de la rotura. Se obtiene el siguiente perfil de tensión neutro-tierra (Figura 86).

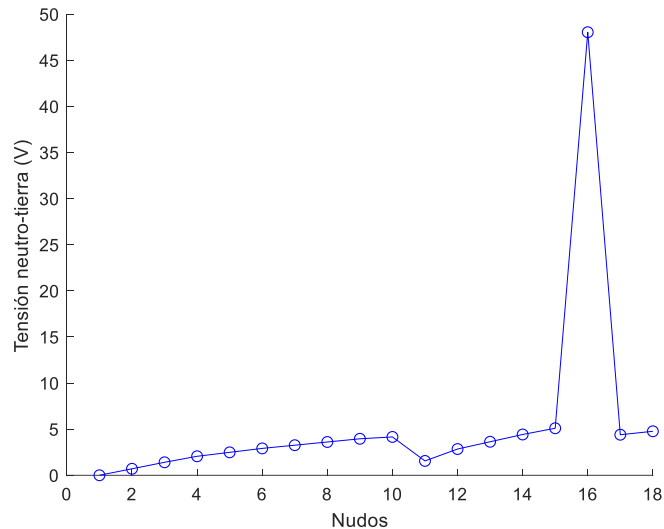


Figura 86: Perfil de tensión neutro-tierra para Caso 6.

De nuevo, se comprueba que el nudo más afectado es aquel donde se produce la rotura del neutro del cliente, permaneciendo el resto de buses poco alterados.

7.2.2.7 Caso 7: [36,32,32], P = 1'7, Rotura carga 15

La tensión neutro-tierra para cada bus se encuentra en forma de perfil de tensión en la Figura 87:

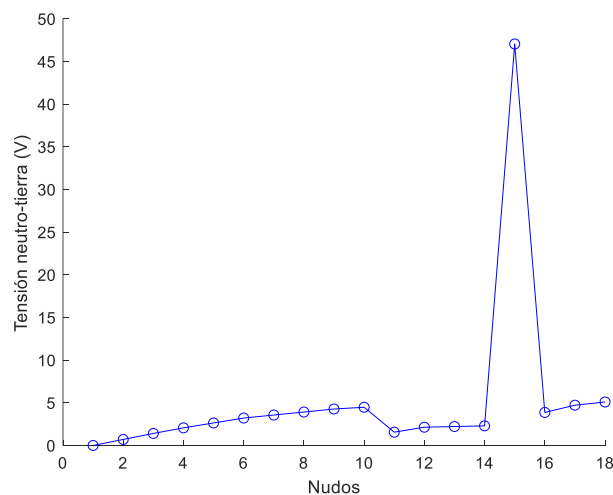


Figura 87: Perfil de tensión neutro-tierra para Caso 7.

Estudiando la figura es confirmar la hipótesis planteada anteriormente: este tipo de rotura no afecta apenas a las cargas adyacentes.

7.2.2.8 Caso 8: [36,32,32], P = 1'7, Rotura carga 11

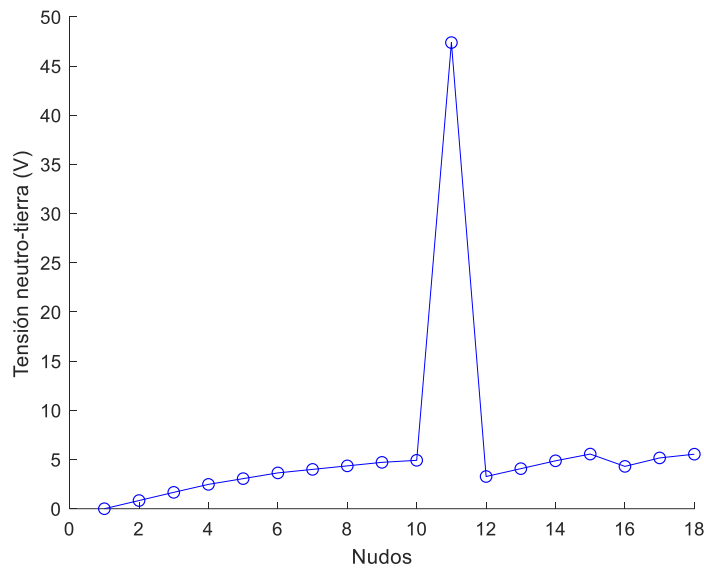


Figura 88: Perfil de tensión neutro-tierra para Caso 8.

En la Figura 88 se obtienen resultados que siguen con la tendencia de este tipo de rotura. Se puede apreciar que el resto de tensiones neutro-tierra siguen siendo muy reducidas (en comparación con la de la carga afectada).

7.2.2.9 Caso 9: [36,32,32], P = 1'7, Rotura carga 11, $R_g = 0 \Omega$

Se quiere ensayar un último caso, para conocer la relación que tiene la puesta a tierra de las cargas adyacentes sobre la tensión neutro-tierra de las propias cargas colindantes a la afectada. Como se ha comentado, la resistencia de puesta a tierra de la propia carga afectada es irrelevante para la tensión U_n del bus.

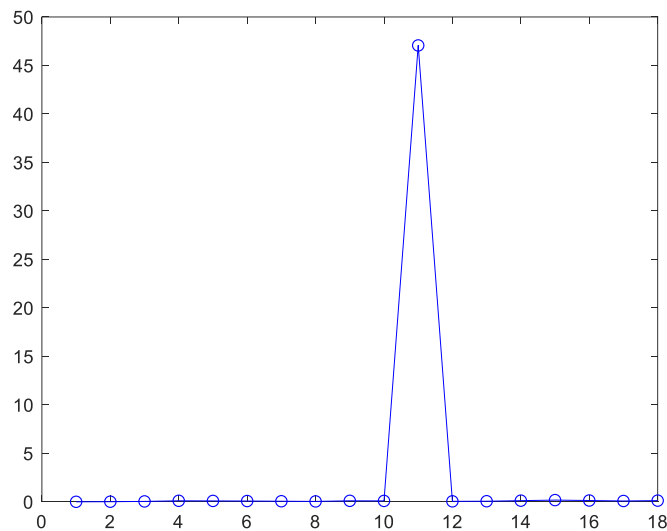


Figura 89: Perfil de tensión neutro-tierra para Caso 9.

Como se aprecia en la Figura 89, una puesta a tierra de valor muy bajo no tiene ningún efecto sobre la propia carga, pero sí sobre las cargas adyacentes. Es por ello que se recomienda una correcta puesta a tierra para cualquier carga, puesto que en el caso de no verse afectada por dicha rotura puede disminuir los valores neutro-tierra y, por consiguiente, disminuir el desequilibrio en las tensiones fase-neutro.

De todos las simulaciones y casos presentados anteriormente, se puede concluir lo siguiente:

- El desequilibrio de las cargas es un factor importante en la mejora/empeoramiento del equilibrio de las tensiones e intensidades de los nudos de la red.
- Igualmente, el aumento de la demanda de las cargas provoca un aumento generalizado de las tensiones neutro-tierra, siendo este fenómeno de especial relevancia en la carga afectada.
- Finalmente, y a diferencia de la rotura de neutro en el lado de la red, se confirma que esta rotura no tiene relevancia significativa en el resto de buses de la red. Esto resulta un punto a favor, ya que en caso de algún problema de este tipo en una red residencial, no se verán apenas afectadas las cargas adyacentes, pudiendo continuar con la explotación simplemente mediante la desconexión de la carga de la red.

8 CONCLUSIONES

A lo largo de la realización del trabajo, diversos aspectos han sido estudiados. En primer lugar, se ha llevado a cabo un proceso de acopio de bibliografía para poder familiarizarnos con el fenómeno de la rotura del neutro desde un punto de vista cualitativo. Posteriormente, ha sido necesario el estudio de un programa de resolución del problema de flujo de cargas, conociendo los distintos bloques que lo componen y su interacción. Este programa requería ser modificado para las situaciones que se han estudiado en el presente documento: Rotura del neutro de la red y rotura del neutro en la parte del cliente.

De manera paralela, se ha validado la implementación que se ha hecho en el programa mediante formulaciones alternativas, que permitían comprobar la veracidad de los datos obtenidos y la modificación del programa en caso de no obtenerse los resultados deseados. También se ha comparado con otros modelos matemáticos que simulan la rotura del neutro para asegurar dicha veracidad.

Una vez se confirmó que los datos eran correctos, se procedió al análisis cualitativo a partir del análisis cuantitativo realizado sobre dos tipos de redes, de menor a mayor complejidad.

Del análisis de la rotura de neutro en el lado de la red, se pueden destacar diversos aspectos:

- La alta influencia de la rotura del neutro en una rama sobre las ramas (y cargas) adyacentes.
- La importancia de unas puestas a tierra correctamente ejecutadas (valores reducidos, muy cercanos a 0 Ω), en particular en la carga afectada por la rotura del neutro. Valores de mayor magnitud, aún siendo pequeños, aumentan el efecto desestabilizador de la rotura.
- La correlación directa existente entre la demanda y el desequilibrio de las cargas, y el desequilibrio de tensiones e intensidades cuando se produce la rotura.
- La importancia del punto de la red donde se produce la rotura del neutro, teniendo un efecto desestabilizador en las ramas y cargas aguas abajo.

Por otra parte, también se han sacado una serie de conclusiones respecto a la rotura del neutro en el lado del cliente:

- El desequilibrio de las cargas y el aumento de demanda de estas son un factor importante que está directamente relacionado con el desequilibrio de tensiones que se produce en la carga afectada.
- La resistencia de puesta a tierra no afecta en el caso de la carga en la que se produce el fenómeno, pero sí se recomiendan valores bajos ya que las puestas a tierra de las cargas adyacentes sí afectan a los valores neutro-tierra alcanzados por ellas.
- Finalmente, y a diferencia de la rotura de neutro en el lado de la red, se confirma que esta rotura no tiene relevancia significativa en el resto de buses.

En cuanto a posibles líneas futuras de investigación, resultaría interesante realizar estudios de prevención de estos fenómenos que, tal y como hemos visto en el presente trabajo, provocan problemas en la red de distribución de baja tensión. Por otra parte, también podría ser de interés profundizar en el modelado de la red, teniendo en cuentas posibles elementos que, con el objetivo de minimizar la complejidad de esta, se han omitido.

REFERENCIAS

- [1] J. Parmar, «Electrical notes & Articles,» 28 07 2012. [En línea]. Available: <https://electricalnotes.wordpress.com/2012/07/28/impact-of-floating-neutral-in-power-distribution/>. [Último acceso: 20 04 2020].
- [2] A. A. Belitckiy y I. N. Voytyuk, «The question of compensation overload neutral wire current in low voltage electrical networks,» *IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus)*, vol. 1, nº 1, pp. 779-783, 2017.
- [3] J. F. Martínez-Canales y J. Alcaide Sanz, «Prevención y atenuación de incidencias por corte de neutro en instalaciones de baja tensión,» *DYNA Ingeniería e Industria*, vol. 74, nº 1, pp. 15-18, 1999.
- [4] J. Sánchez Reyes, «Formulación y Programación de un Flujo de Cargas Ampliado para Redes Trifásicas a Cuatro Hilos,» *Trabajo Fin de Máster*, 2017.
- [5] W. H. Kersting, *Distribution system modelling and analysis*, Boca Raton, Florida: CRC Press, 2002.
- [6] L. Ramos de Araujo, D. R. Ribeiro Penido, J. Sandoval Carneiro y J. L. Rezende Pereira, «A Study of Neutral Conductors and Grounding Impacts on the Load-Flow Solutions of Unbalanced Distribution Systems,» *IEEE Transactions on power systems*, vol. 31, nº 5, pp. 3684-3692, 2016.
- [7] BOE, *Real Decreto 1955/2000, de 1 de diciembre, por el que se regulan las actividades de transporte, distribución, comercialización, suministro y procedimientos de autorización de instalaciones de energía eléctrica*, 1995.
- [8] CIGRE Task Force C6.04.02, "Benchmark Systems for Network Integration of Renewable and Distributed Energy Resources," *CIGRE*, 2014.

9 ANEXO I

En el Anexo I se viene a presentar los valores de impedancia de línea adoptados para el cálculo en la herramienta matemática de las redes más sencillas, esto es, la red formada por un generador y una carga y la red con cargas en paralelo.

Se especifican, en la Tabla 16, el valor de la matriz de impedancias para un conductor de aluminio y de cobre, las dos tipologías que se han planteado.

Tabla 16: Matriz primitiva de impedancias para conductor aluminio/cobre.

CONDUCTOR		Matriz primitiva de impedancias (Ω/km)			
		A	B	C	D
Aluminio	A	0,2719+0,8189j	0,0493+0,7362j	0,0493+0,7362j	0,0493+0,7239j
	B	0,0493+0,7362j	0,2719+0,8189j	0,0493+0,7362j	0,0493+0,7239j
	C	0,0493+0,7362j	0,0493+0,7362j	0,2719+0,8189j	0,0493+0,7239j
	N	0,0493+0,7239j	0,0493+0,7239j	0,0493+0,7239j	0,3822+0,8342j
Cobre	A	0,1357+0,8003j	0,0493+0,7221j	0,0493+0,7221j	0,0493+0,7078j
	B	0,0493+0,7221j	0,1357+0,8003j	0,0493+0,7221j	0,0493+0,7078j
	C	0,0493+0,7221j	0,0493+0,7221j	0,1357+0,8003j	0,0493+0,7078j
	N	0,0493+0,7078j	0,0493+0,7078j	0,0493+0,7078j	0,1834+0,8189j

Por otra parte, para conocer también los datos de los conductores utilizados en la subred residencial de la CIGRE, se muestra la Tabla 17:

Tabla 17: Matriz primitiva de impedancias para conductores subterráneos de la red CIGRE.

CONDUCTOR		Matriz primitiva de impedancias (Ω/km)			
		A	B	C	D
UG1-3ph	A	0,221+0,747j	0,049+0,673j	0,049+0,673j	0,049+0,651j
	B	0,049+0,673j	0,221+0,747j	0,049+0,673j	0,049+0,651j
	C	0,049+0,673j	0,049+0,673j	0,221+0,747j	0,049+0,651j
	N	0,049+0,651j	0,049+0,651j	0,049+0,651j	0,221+0,747j
UG2-3ph	A	0,314+0,762j	0,049+0,687j	0,049+0,687j	0,049+0,887j
	B	0,049+0,687j	0,314+0,762j	0,049+0,687j	0,049+0,887j
	C	0,049+0,687j	0,049+0,687j	0,314+0,762j	0,049+0,887j
	N	0,049+0,887j	0,049+0,887j	0,049+0,887j	0,314+0,762j
UG3-3ph	A	0,871+0,797j	0,049+0,687j	0,049+0,687j	0,049+0,719j
	B	0,049+0,687j	0,871+0,797j	0,049+0,687j	0,049+0,719j
	C	0,049+0,687j	0,049+0,687j	0,871+0,797j	0,049+0,719j
	N	0,049+0,719j	0,049+0,719j	0,049+0,719j	0,871+0,797j