



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA
BARCELONATECH
Escola d'Enginyeria de Barcelona Est

TRABAJO FINAL DE GRADO

Grado en Ingeniería Eléctrica

**ESTUDIO DEL FLUJO ARMÓNICO DE CARGAS EN REDES
ELÉCTRICAS IEEE N-BUSES**



Memoria y Anexos

Autor: Oriol Cartiel Arasa
Director: Juan José Mesas García
Codirector: Luis Sainz Sopera
Convocatoria: Junio 2020

Resumen

El presente proyecto tiene como finalidad dar respuesta al estudio del flujo armónico de cargas resuelto a partir del método de la penetración de armónicos, aplicado a un ejemplo práctico. Para ello, en primer lugar, se define el concepto de sistema eléctrico de potencia y, a continuación, se habla de qué y cuáles son las redes IEEE n-buses más típicas. Se prosigue con la explicación del método de las matrices de incidencia, que se utilizará para obtener las respectivas matrices de admitancias de bus en distintas circunstancias de las redes. Por último, se expone y resuelve el flujo de cargas fundamental, para distintos casos de cada una de las redes, para que así, finalmente, se desarrolle el flujo armónico de cargas en el caso concreto de la red IEEE 14-buses. Como análisis final, tras todo el desarrollo principal del proyecto, se llega a la conclusión de la gran relevancia que tiene realizar este tipo de estudio, debido a la influencia no despreciable de los armónicos tras introducir cargas no lineales en las redes eléctricas.

Resum

El present projecte té com a finalitat donar resposta a l'estudi del flux harmònic de càrregues resolt a partir del mètode de la penetració d'harmònics, aplicat a un exemple pràctic. Per a això, en primer lloc, es defineix el concepte de sistema elèctric de potència i, a continuació, es parla de què i quines són les xarxes IEEE n-busos més típiques. Es prossegueix amb l'explicació del mètode de les matrius d'incidència, que s'utilitzarà per a obtenir les respectives matrius d'admitàncies de bus en diferents circumstàncies de les xarxes. Finalment, s'exposa i resol el flux de càrregues fonamental, per a diferents casos de cadascuna de les xarxes, perquè així, finalment, es desenvolupi el flux harmònic de càrregues en el cas concret de la xarxa IEEE 14-busos. Com a anàlisi final, després de tot el desenvolupament principal del projecte, s'arriba a la conclusió de la gran rellevància que té realitzar aquest tipus d'estudi, a causa de la influència no menyspreable dels harmònics després d'introduir càrregues no lineals en les xarxes elèctriques.

Abstract

The purpose of this project is to provide a response to the harmonic load flow study resolved with the harmonic penetration method, applied to a practical example. To do this, firstly, the concept of electrical power system is defined, and then is argued what and which are the most typical IEEE n-buses network cases. It continues with the explication of the incidence matrix method, which will be used to obtain the respective bus admittance matrix in different circumstances of the networks. Finally, the fundamental load flow is exposed and solved, for different cases of each network, so that, by last the harmonic load flow is developed in the specific case of the IEEE 14-bus power system. As a final analysis, after all the main development of the project, the conclusion is reached of the great relevance of carrying out this type of study, due to the non-negligible influence of harmonics after introducing non-linear loads into electrical power systems.





Agradecer a mi tutor su dedicación y soporte a lo largo del proyecto. También a mis padres y pareja por el apoyo y confianza en mi trabajo. Sin cada uno de ellos, no hubiese sido posible.



Glosario

Se detalla el significado de cada una de las nomenclaturas que irán apareciendo a lo largo del trabajo, las cuales también se muestran justificadas en el primer contexto en el cual aparecen.

SEP	Sistema eléctrico de potencia	CA	Corriente alterna
S	Potencia aparente o compleja	CC	Corriente continua
P	Potencia activa o real	Y_{BUS}	Matriz de admitancias de bus
Q	Potencia reactiva o imaginaria	HLF	Flujo armónico de cargas
FLF	Flujo de cargas fundamental	HP	Penetración de armónicos
NR	Newton-Raphson	FLFm	Flujo de cargas fundamental modificado
GS	Gauss-Seidel	VN	Tensiones de nudo
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers	HVDC	High Voltage Direct Current
BOE	Boletín Oficial del Estado	SVC	Static VAR Compensators
THD	Distorsión armónica total	NL	No lineal



ÍNDICE

RESUMEN	I
RESUM	II
ABSTRACT	III
GLOSARIO	VII
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Objetivos del trabajo.....	1
1.2. Alcance del trabajo	1
2. CONCEPTO DE SISTEMA ELÉCTRICO DE POTENCIA	3
2.1. Elementos que conforman un SEP.....	3
2.1.1. Generadores.....	3
2.1.2. Líneas.....	4
2.1.3. Transformadores.....	6
2.1.4. Cargas	7
2.1.5. Buses	7
3. ESTUDIO DE LAS REDES IEEE N-BUSES MÁS TÍPICAS Y DETERMINACIÓN DE SUS RESPECTIVAS MATRICES DE ADMITANCIAS DE BUS EMPLEANDO MATRICES DE INCIDENCIA	9
3.1. Redes IEEE n-buses.....	9
3.1.1. Red IEEE 3-buses.....	10
3.1.2. Red IEEE 14-buses.....	11
3.1.3. Red IEEE 30-buses.....	15
3.2. Formulación método matrices de incidencia.....	22
3.2.1. Programación con <i>Matlab</i> de la automatización de la Y_{BUS}	26
3.2.2. Y_{BUS} característica de la red IEEE 3-buses.....	27
3.2.3. Y_{BUS} característica de la red IEEE 14-buses.....	28
3.2.4. Y_{BUS} característica de la red IEEE 30-buses.....	30
4. ESTUDIO DEL FLUJO DE CARGAS FUNDAMENTAL EN REDES IEEE N-BUSES	35
4.1. Formulación del problema de flujo de cargas fundamental.....	36
4.1.1. Definición y clasificación de las variables	36
4.1.2. Ecuaciones de potencia.....	37

4.2.	Resolución del problema de flujo de cargas fundamental	38
4.2.1.	Método de Gauss-Seidel.....	39
4.2.2.	Método de Newton-Raphson.....	42
4.2.3.	Comparación GS vs NR.....	47
4.3.	Otras determinaciones del problema de flujo de cargas fundamental.....	48
4.4.	Programación con <i>Matlab</i> de la automatización completa de GS y NR.....	49
4.5.	Resultados del estudio del flujo de cargas fundamental en las redes IEEE n-buses	51
4.5.1.	Resultados red IEEE 3-buses.....	52
4.5.2.	Resultados red IEEE 14-buses.....	54
4.5.3.	Resultados red IEEE 30-buses.....	60
4.5.4.	Comparación de convergencia GS vs NR.....	69
5.	ESTUDIO DEL FLUJO ARMÓNICO DE CARGAS EN REDES IEEE N-BUSES CUANDO EN ELLAS HAY PRESENCIA DE CARGAS NO LINEALES _____	71
5.1.	Concepto de distorsión armónica en señales periódicas.....	72
5.1.1.	Serie de Fourier	72
5.1.2.	Distorsión armónica total	73
5.1.3.	Definición de potencia con armónicos.....	74
5.1.4.	Armónicos característicos	75
5.2.	Modelización armónica de los elementos de un SEP.....	76
5.2.1.	Modelo armónico líneas de transporte.....	76
5.2.2.	Modelo armónico transformadores.....	77
5.2.3.	Modelo armónico generadores del sistema (bus Slack o PV)	78
5.2.4.	Modelo armónico cargas lineales del sistema	78
5.2.5.	Modelo filtro de armónicos y banco de condensadores	79
5.2.6.	Modelo convertidor HVDC y SVC.....	80
5.3.	Formulación teórica del flujo armónico de cargas.....	84
5.3.1.	Penetración de armónicos (HP)	85
5.4.	Programación con <i>Matlab</i> de la automatización completa del HLF con el método de la HP	87
5.5.	Resultados del estudio del flujo armónico de cargas a partir del método de la HP en la red IEEE 14-buses.....	88
5.5.1.	Red IEEE 14-buses modificada.....	89
5.5.2.	Resultados de la HP en la red IEEE 14-buses modificada	92
6.	ANÁLISIS DEL IMPACTO AMBIENTAL _____	101
6.1.	Clasificación y análisis de los agentes con impacto ambiental.....	101

6.2.	Cálculo de la huella de carbono.....	102
6.2.1.	Emisiones indirectas por energía eléctrica	102
6.2.2.	Otras emisiones indirectas.....	102
6.2.3.	Huella de carbono total.....	103
7.	PRESUPUESTO	105
7.1.	Costes de los recursos humanos.....	105
7.2.	Costes de los recursos materiales.....	106
7.3.	Costes totales	106
	CONCLUSIONES	107
	BIBLIOGRAFÍA	109
	ANEXO A. MATRIZ DE ADMITANCIAS DE BUS (Y_{BUS})	111
A1.	Código en <i>Matlab</i> para calcular las Y_{BUS} de las redes IEEE n-buses con el método de las matrices de incidencia	112
	ANEXO B. RESOLUCIÓN DEL FLUJO DE CARGAS FUNDAMENTAL (FLF)	115
B1.	Código en <i>Matlab</i> para resolver el FLF de las redes IEEE n-buses mediante Gauss-Seidel	116
B2.	Código en <i>Matlab</i> para resolver el FLF de las redes IEEE n-buses mediante Newton-Raphson	126
	ANEXO C. RESOLUCIÓN DEL FLUJO ARMÓNICO DE CARGAS (HLF) MEDIANTE EL MÉTODO DE LA PENETRACIÓN DE ARMÓNICOS (HP)	137
C1.	Código en <i>Matlab</i> para resolver el FLFm (de la HP) la red IEEE 14-buses modificada mediante Newton-Raphson	138
C2.	Código en <i>Matlab</i> para resolver el VN (de la HP) de la red IEEE 14-buses modificada.....	147

1. Introducción

A consecuencia del actual crecimiento de la electrónica de potencia, han ido apareciendo una serie de elementos en las redes, provenientes de este campo de la ingeniería, cuyo comportamiento está caracterizado por ser el responsable de inyectar armónicos en la misma, así pues, a estos se les considera como cargas no lineales. Eso propicia a no poder considerar, a rasgos generales, a la red como un sistema complejo con un comportamiento lineal y senoidal puro, ya que la influencia de las cargas no lineales implica una serie de distorsiones en la forma de onda de corriente alterna. Es por ello que los estudios de armónicos están cogiendo una gran transcendencia en la actualidad, debido a la necesidad que aparece por cuantificar la distorsión armónica presente en la red, para así, finalmente, poder mitigar y/o eliminar los efectos negativos que estos tienen.

A partir de este punto, se diferenciarán dos tipos de estudio, determinados según haya o no consideración de presencia de cargas no lineales en la red. Por un lado, el estudio del flujo de cargas fundamental y, después, el estudio del flujo armónico de cargas. Ambos métodos guardan una relación entre sí, ya que al armónico se le conoce como una extensión del fundamental, todo y eso, se tratan distintamente y se les otorga una diferenciación clara. Por lo tanto, cuando se trabaje con el estudio del flujo de cargas fundamental, se considerará a la red como un sistema complejo integrado en su totalidad por cargas lineales, las cuales solo proporcionaran tensiones, intensidades y potencias a frecuencia fundamental (50 Hz en España). Así pues, cuando se considere la presencia de cargas no lineales en la red, se deberá emplear el estudio del flujo armónico de cargas, el cual tiene presente que dichas cargas inyectarán a la red ciertos valores de tensión, corriente y potencia a frecuencia múltiplo de la fundamental, es decir, implicarán una inyección de determinados armónicos en la red.

1.1. Objetivos del trabajo

Con el previo conocimiento de cómo se formula el estudio del flujo de cargas fundamental, el objetivo de este proyecto se encuentra en conocer, entender y aplicar el correspondiente análisis del estudio del flujo armónico de cargas a un caso práctico. Además, también se considera el estudio e implementación de una nueva técnica para hallar la matriz de admitancias de bus (Y_{BUS}), conocido como método de las matrices de incidencia. Todo ello aplicado a redes eléctricas IEEE n-buses.

1.2. Alcance del trabajo

Con tal de delimitar el contenido del proyecto, se definen una serie de aspectos principales e hipótesis de inicio con tal de fijar dichos límites. En primer lugar, se considera a la red como un

sistema con distribución energética en corriente alterna trifásica, donde sus tres fases son simétricas y equilibradas funcionando en régimen sinusoidal permanente y, además, todas las cargas (tanto monofásicas como trifásicas) se encuentran distribuidas de forma equilibrada. Seguidamente, no habrá presencia de elementos magnéticamente acoplados, entonces, se simplificarán dichos modelos pertinentes, implicando así que, por ejemplo, los transformadores se modelicen sin inductancia mutua. En último lugar, se enumerarán tres puntos, los cuales hacen referencia a la estructura principal que toma la memoria y de la cual se parte para el desarrollo completo del proyecto:

- Hacer una búsqueda de las redes IEEE n-buses más típicas y calcular sus matrices de admitancias de bus con matrices de incidencia.
- Resolver y analizar el flujo de cargas fundamental de las redes IEEE n-buses estudiadas.
- Resolver y analizar el flujo armónico de cargas de una de las redes IEEE n-buses estudiadas.

De esta forma, el proyecto queda acotado a los aspectos mencionados.

2. Concepto de sistema eléctrico de potencia

Un SEP (Sistema Eléctrico de Potencia) se define como un conjunto de instalaciones eléctricas, las cuales trabajan conjuntamente de manera directa o indirecta, con el fin de generar, transportar y distribuir energía eléctrica para satisfacer una demanda de ese tipo de energía. [1]

2.1. Elementos que conforman un SEP

Un SEP está compuesto principalmente por los elementos expuestos a continuación. En primer lugar, se encuentran los generadores, los cuales producen la energía eléctrica a partir de las materias primas necesarias según convenga. Posteriormente, dicha energía es conducida mediante líneas de transporte para así ser distribuida y transportada donde sea necesario. En tercer lugar, al comienzo, mitad y/o bien al final de dichas líneas, se encuentran las estaciones y subestaciones transformadoras, las cuales desarrollan la función de elevar y/o reducir el nivel de tensión y/o bien, servir como elementos de corte y protección en caso de avería en la red. Todo ello, se encuentra interrelacionado con la finalidad de hacer llegar dicha energía a un punto, en el cual se encuentra conectada una carga, quien empleará dicha energía generada en su uso y, por lo tanto, siendo éste el primer detonante de que se lleve a cabo la generación energética inicial. Para finalizar, se deben mencionar a los buses, los cuales funcionan como puntos estratégicos en los que se encuentran conectados toda la aparamenta eléctrica mencionada anteriormente, tal que, por ejemplo, un bus sirva como nodo o punto de conexión entre varias líneas o bien como “by pass” entre un transformador y la línea de transporte que le sigue, para así, servir como referencia de localización en la red donde se trabaje.

Debido al estudio que se lleva a cabo en este proyecto, surge la necesidad y el interés, de dar conocimiento en referencia a conocer el modelo eléctrico y el comportamiento que desarrollan cada uno de los elementos nombrados anteriormente, los cuales definen un SEP. Así pues, a continuación, se sintetiza y muestra de un modo esquematizado el modelo teórico, matemático y eléctrico, que ayudará a comprender pasos posteriores en el trabajo, de los generadores, transformadores, líneas, cargas y buses.

2.1.1. Generadores

Los generadores forman una parte fundamental en la existencia de la red, ya que éstos son los encargados de transformar/crear, para así después aportar al sistema, la energía requerida en la instalación, es decir, generan la energía necesaria para satisfacer la demanda existente en la red. Adicionalmente, también pueden actuar como compensadores síncronos, esto significa que se pueden emplear como compensadores de energía reactiva.

En el aspecto técnico, dentro de los SEP, se les modeliza mediante una potencia compleja generada, es decir, mediante una potencia activa y reactiva, además, también poseen una admitancia interna conectada a tierra, la cual viene dada tras llevar a cabo la conversión de la reactancia en serie junto con la fuente de tensión ideal (modelo de Thévenin del generador) al esquema equivalente de Norton. Cabe decir que, en el caso de actuar como compensadores síncronos, únicamente se conocerá el valor de potencia activa (valor nulo), ya que el de potencia reactiva será incógnita debido a que es el parámetro a determinar. Asimismo, la representación gráfica que suele aparecer es la mostrada a continuación, donde se sintetiza todo lo dicho.

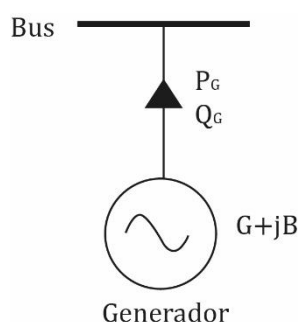


Figura 2.1. Esquema equivalente de un generador en un SEP.

2.1.2. Líneas

Las líneas aéreas trifásicas se modelizan tal como se muestra en la figura 2.2, donde cada fase presenta una resistencia e inductancia propia y una conductancia y capacidad entre ella misma y cada una de las otras dos fases y, también, entre ella y tierra. Además, también existe una inductancia mutua entre una fase y cada una de las inductancias de las otras dos fases.

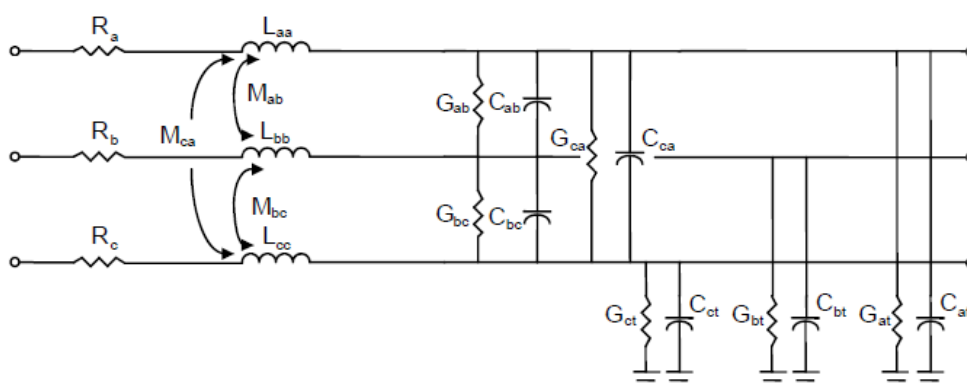


Figura 2.2. Circuito equivalente completo de una línea aérea de transporte. [2]

Con la finalidad de simplificar, tal que permita trabajar con un esquema equivalente más simple de manejar, se deben considerar dos hipótesis principales: en la línea trifásica debe existir equilibrio y simetría en la generación y, además, equilibrio en las cargas. Considerando esto, se

deduce que se puede trabajar con el esquema equivalente de una fase, ya que éste es el mismo que el de cada una de las otras. Además, se menosprecia la inductancia mutua entre fases, así como también las capacidades y conductancias entre fases. En consecuencia, se obtiene el siguiente circuito (figura 2.3), el cual representa al equivalente circuital de una fase de la línea aérea de transporte. Así pues, el modelo resultante vendría dado por una resistencia e inductancia de la fase, juntamente con una conductancia y una capacidad conectadas entre la fase y tierra, tal como se muestra en la siguiente figura.

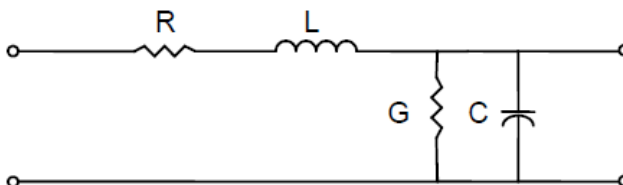


Figura 2.3. Circuito equivalente simplificado de una línea aérea de transporte. [2]

Para finalizar, con tal de poder transformar dicho modelo de una línea trifásica en un circuito eléctrico equivalente, para así poder trabajar en el estudio pertinente con un modelo adaptado, a éste se les modeliza a sus componentes mediante un esquema pi, tal como se muestra en la figura 2.4. La componente Z_T equivale a la impedancia longitudinal total, la cual viene representada en la ecuación 2.1, donde R es la resistencia y la X_L la reactancia inductiva. Por otro lado, la componente Y_T equivale a la admitancia transversal total, se representa tal como se muestra en la ecuación 2.2, donde G es la conductancia y B_C la susceptancia capacitiva, siendo esta la inversa de la reactancia capacitiva (X_C).

$$Z_T = R + jX_L = R + j\omega L \tag{Eq. 2.1}$$

$$Y_T = G + jB_C = G + j\omega C \tag{Eq. 2.2}$$

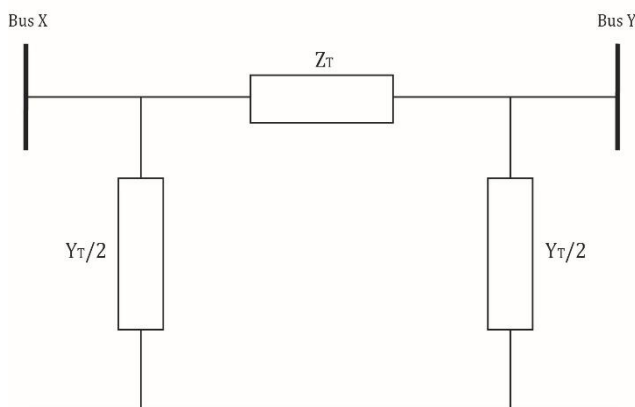


Figura 2.4. Esquema "pi" del circuito equivalente de una línea eléctrica de transporte.

2.1.3. Transformadores

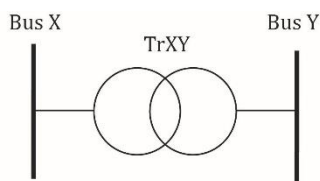


Figura 2.5. Representación ilustrativa de un transformador conectado entre dos buses en un SEP.

En el aspecto de representación circuital, al transformador, mayormente, se lo modeliza con el esquema pi equivalente a una línea corta [3], es decir, únicamente existe la impedancia longitudinal de línea, ocurriendo esto cuando el transformador no presenta regulación. Esto viene dado debido a su geometría y a los valores de sus parámetros internos de impedancia e admitancia. Por lo tanto, en la figura 2.6 se expone como quedaría el esquema pi equivalente de un transformador cuando éste no posee regulación, siendo, tal como ya se ha dicho, cuando se le considera como una línea corta. En contraposición se encuentran los transformadores con regulación, los cuales presentan esquemas de mayor complejidad. Tal como se muestra en la figura 2.7, cuyos dos modelos vienen dados según qué tipo de ratio se emplea para su modelización (si 1:t o a:1) [4], se debe utilizar uno u otro modelo, aun así, ambos parten del mismo concepto, el esquema pi equivalente de una línea (no corta). Entonces, lo que se debe hacer es sustituir la incógnita (t o a) correspondiente según convenga, para finalmente, conocer los valores que toman las “patas” del esquema pi, las cuales son las admitancias transversales conectadas entre bus y tierra. Con la finalidad de entender qué modelo se debe escoger, si el de “t” o el de “a”, se debe tener en cuenta lo siguiente: el modelo de “t” representa el esquema en el cual el transformador ideal se encuentra modelizado a la derecha y la impedancia interna a la izquierda de éste, es decir, conectada en el lado primario del transformador. Por el contrario, el modelo de “a” es el que se representa a su izquierda el transformador ideal y a la derecha del mismo, conectado en el secundario, la impedancia interna. Cabe decir que en este estudio se empleará el modelo de “a” debido a las características de modelización que presentan los transformadores en las redes eléctricas IEEE n-buses. Así pues, tras substituir y calcular, se obtiene el modelo equivalente a una línea, pero en este caso, equivaldría al esquema de un transformador con regulación.

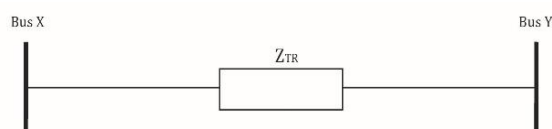


Figura 2.6. Esquema pi equivalente de un transformador como una línea corta.

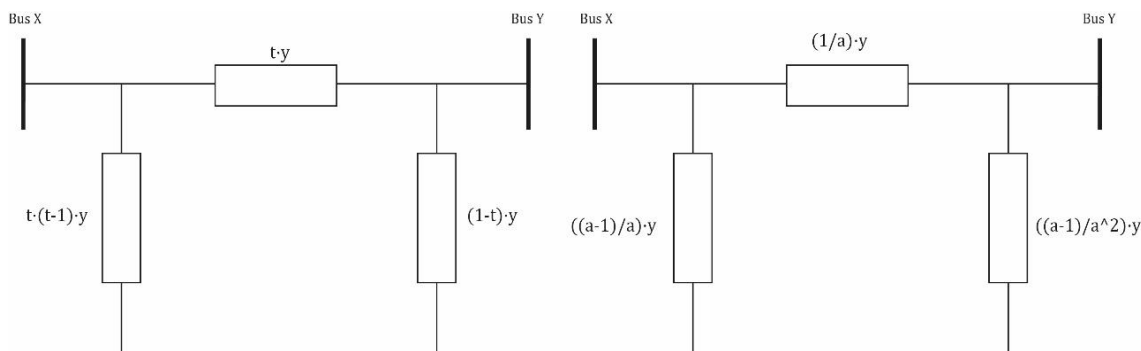


Figura 2.7. Esquema pi equivalente de un transformador con regulación. 1-Ratio 1:t / 2-Ratio a:1.

2.1.4. Cargas

Las cargas, las cuales son las demandantes de potencia activa y reactiva, su modelo en los SEP se representa únicamente cuantificando el valor de potencia que se demanda, tal como se muestra en la figura 2.8.

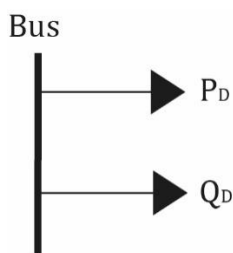


Figura 2.8. Representación ilustrativa de una carga conectada a un bus determinado en un SEP.

2.1.5. Buses

En último lugar se encuentran los buses, donde el objetivo principal en éstos es el de conocer su naturaleza, para que posteriormente se lleve a cabo una clasificación de los mismos. En ellos aparecen cuatro variables fundamentales que los determinan, las cuales son: módulo de tensión, ángulo de tensión, potencias activa y reactiva inyectadas.

A partir de conocer las variables que los definen, se diferencian tres tipos de buses, el bus tipo Slack o Swing, el PV y el PQ.

En primer lugar, al bus Slack se le codifica como bus número 1, ya que su ángulo se le considera el de referencia respecto al del resto de buses, además, su valor del módulo de tensión viene definido y, por último, sus potencias inyectadas son incógnita. Solo puede existir un bus Slack en toda la red.

En segundo lugar, se encuentran los buses PV, también conocidos como buses de tensión controlada. En este tipo de bus se considera dato el módulo de la tensión y el valor de la potencia

activa generada, restando como variables a encontrar el ángulo de desfase δ y la potencia reactiva generada Q_G . Adicionalmente, en el caso de existir límites de generación de potencia reactiva, se deberá reajustar el bus durante la fase de cálculos, fijando su potencia reactiva en el límite que convenga y dejando como variable el módulo de su tensión, es decir, transformar el bus a uno de PQ, proceso que será mencionado en posteriores apartados cuando se lleven a cabo las argumentaciones referentes al procedimiento de resolución que corresponda (apartado 4).

En último lugar, encontramos los buses PQ, dónde no existe la conexión de ningún generador, sino que, únicamente viene conectada una carga la cual demanda una potencia activa y reactiva determinada. Por lo tanto, restan como incógnitas, siendo objeto de cálculo en el problema de flujo de cargas, el valor de su tensión, en módulo y ángulo.

Para concluir, en este proyecto, con tal de definir e identificar a los buses, para así clasificarlos de un modo más sencillo y práctico de cara a implementar dicha clasificación a los estudios desarrollados posteriormente, se lleva a cabo una numeración de los mismos des del 1 al 3. Entonces, a los tres tipos de buses se les codifica a partir de un número, tomando el bus Slack el nº 1, el PV el nº 2 y el PQ el nº 3.

Todo ello viene sintetizado en la tabla 2.1.

Tabla 2.1. Identificación de los tipos de bus junto con las variables de un SEP.

Tipo de Bus	Código	Variables			
		V	δ	P	Q
Slack (o Swing)	1	✓	✓	x	x
PV	2	✓	x	✓	x
PQ	3	x	x	✓	✓

3. Estudio de las redes IEEE n-buses más típicas y determinación de sus respectivas matrices de admitancias de bus empleando matrices de incidencia

A continuación, se va a llevar a cabo una búsqueda, estudio y exposición de las redes IEEE n-buses más típicas, para así posteriormente determinar cuáles son sus matrices de admitancias de bus a partir de una nueva técnica estudiada, y expuesta más adelante, nombrada como método de las matrices de incidencia. Todo ello, con la finalidad de presentar y elaborar la primera toma de contacto con estos tipos de redes, para que en apartados posteriores del proyecto se pueda llevar a cabo los estudios por los cuales se fundamenta éste proyecto, siendo, por ejemplo, el estudio del flujo de cargas fundamental o, bien, el estudio del flujo armónico de cargas.

3.1. Redes IEEE n-buses

Las redes IEEE n-buses son un conjunto de redes, creadas por parte de científicos e investigadores de la comunidad IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*) [5], las cuales vienen caracterizadas por tener como finalidad la de establecer unas bases y un punto de partida, para todos los investigadores del mundo, en el estudio de las redes eléctricas de potencia. Por lo tanto, cuando alguien decida llevar a cabo un estudio sobre los SEP, en caso de que quiera que su estudio posea oficialidad por parte de la comunidad IEEE, deberá llevar a cabo su estudio con una de estas redes estandarizadas. Llevando a cabo esto, se pretende que haya una universalidad en dichos estudios y que los resultados obtenidos en todos ellos con dichas redes puedan compararse, contrastarse y, finalmente, sacar conclusiones comunes.

Por otro lado, todas estas redes tienen su trasfondo y su origen en algún lugar, así pues, a continuación, además de exponer y detallar como se encuentran estructuradas junto con todos los datos que las conforman, se argumentará, en los casos que exista dicha información, de donde provienen y como se crearon. Cabe decir que, en cada uno de los subapartados de cada red, se expondrán dos tablas correspondientes a los datos de los buses, una con los valores sin tener en cuenta los límites de generación de Q, los cuales toman valores límite de -500 y 500 MVA, con la finalidad de representar la inexistencia de límites en el generador al ser valores muy grandes, y, por otro lado, en la otra tabla aparecerán los valores de Q límite característicos y reales.

Para concluir, en los siguientes apartados, tal como se ha dicho, se expondrán distintas redes IEEE n-buses, las cuales se emplearán en el estudio presente de éste proyecto, estas son: IEEE 3-buses, IEEE 14-buses y IEEE 30-buses. Respectos a ellas se expondrá en un principio sus valores estándar, no siendo los valores originarios de la red real, ya que, al igual que en distintos estudios

científicos existentes, se emplean unos valores ligeramente modificados de éstas redes, con tal de poder conocer si el análisis llevado a cabo es correcto o no, por el hecho que los resultados que se tienen son a partir de estas redes levemente modificadas. Todo y eso, se ha añadido, además, los valores reales de los parámetros de las redes IEEE 14-buses y IEEE 30-buses, esto debido, en un comienzo, a que se ha logrado hallarlos y, así después, con estos, se puede obtener también una entrada de datos original con el aspecto relevante de que el parámetro del factor de regulación de algunos de los transformadores es distinto de 1 ($a \neq 1$). Este hecho es relevante para también demostrar que se puede resolver, tal como se verá más adelante, redes con transformadores cuyos factores de regulación sean distintos de 1 ($a \neq 1$).

3.1.1. Red IEEE 3-buses

En el caso de la red IEEE 3-bus no se conoce ni la procedencia ni el autor. Por lo tanto, únicamente se exponen todos los datos conocidos de la misma (líneas y buses), además de su representación gráfica. Estos datos han sido recopilados de la referencia [6].

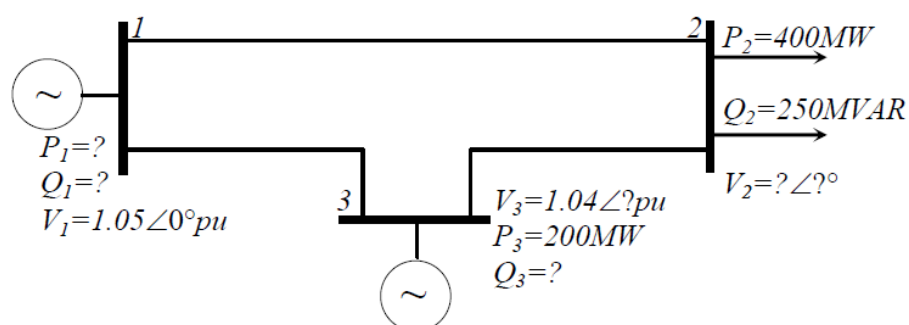


Figura 3.1. Representación esquemática de la red IEEE 3-buses. [6]

Tabla 3.1. "Standard IEEE 3-Bus Test System Circuit Data".

Rama no.	Desde el Bus	Al Bus	Resistencia	Reactancia	Semisusceptancia	Transformador TAP
			R	X	B/2	a
			p.u.	p.u.	p.u.	p.u.
1	1	2	0,02	0,04	0,03	0
2	1	3	0,01	0,03	0,02	0
3	2	3	0,0125	0,025	0,025	0

Tabla 3.2. "Standard IEEE 3-Bus Test System Bus Data with generator Q limits".

Bus no.	Tipo de bus	Tensión de bus		Generación de potencia		Demanda de potencia		Límites de Q generación		Admitancia shunt	
		V	δ	P _{Gi}	Q _{Gi}	P _{Li}	Q _{Li}	Q _{min}	Q _{max}	G _{sh}	B _{sh}
		p.u.	deg.	MW	Mvar	MW	Mvar	Mvar	Mvar	p.u.	p.u.
1	1	1,05	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	3	1,00	0	0	0	400	250	-40	50	0	0
3	2	1,04	0	200	0	0	0	0	40	0	0
Base MVA = 100											

Tabla 3.3. "Standard IEEE 3-Bus Test System Bus Data without generator Q limits".

Bus no.	Tipo de bus	Tensión de bus		Generación de potencia		Demanda de potencia		Límites de Q generación		Admitancia shunt	
		V	δ	P _{Gi}	Q _{Gi}	P _{Li}	Q _{Li}	Q _{min}	Q _{max}	G _{sh}	B _{sh}
		p.u.	deg.	MW	Mvar	MW	Mvar	Mvar	Mvar	p.u.	p.u.
1	1	1,05	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	3	1,00	0	0	0	400	250	-500	500	0	0
3	2	1,04	0	200	0	0	0	-500	500	0	0
Base MVA = 100											

3.1.2. Red IEEE 14-buses

La red IEEE 14-buses representa una parte del sistema eléctrico estadounidense del febrero el 1962, más concretamente del medio oeste de los EEUU. Los datos fueron proporcionados por Iraj Dabbagchi de AEP e introducidas en las bases de datos comunes del IEEE por Rich Christie de la Universidad de Washington, en agosto de 1993.

Tanto los datos de buses, como los de las líneas, junto con una muestra de la representación esquemática del sistema de 14 buses, se expone a continuación en las siguientes tablas y figura, cuyos datos han sido extraídos de [4], aunque cabe decir que algunos de los parámetros de sus líneas han sido corregidos respecto a los valores originales de dicha red, ya que esta fuente presentaba errores leves de transcripción. Entonces, se quería enfatizar el hecho que aparecen leves diferencias y que eso conllevará a pequeñas variaciones en los resultados finales respecto del estudio del autor con los de este. Adicionalmente, a continuación de los datos característicos estándar, también se exponen tabulados los datos originales de la red, los cuales aparecen en [7], lugar de donde se han extraído.

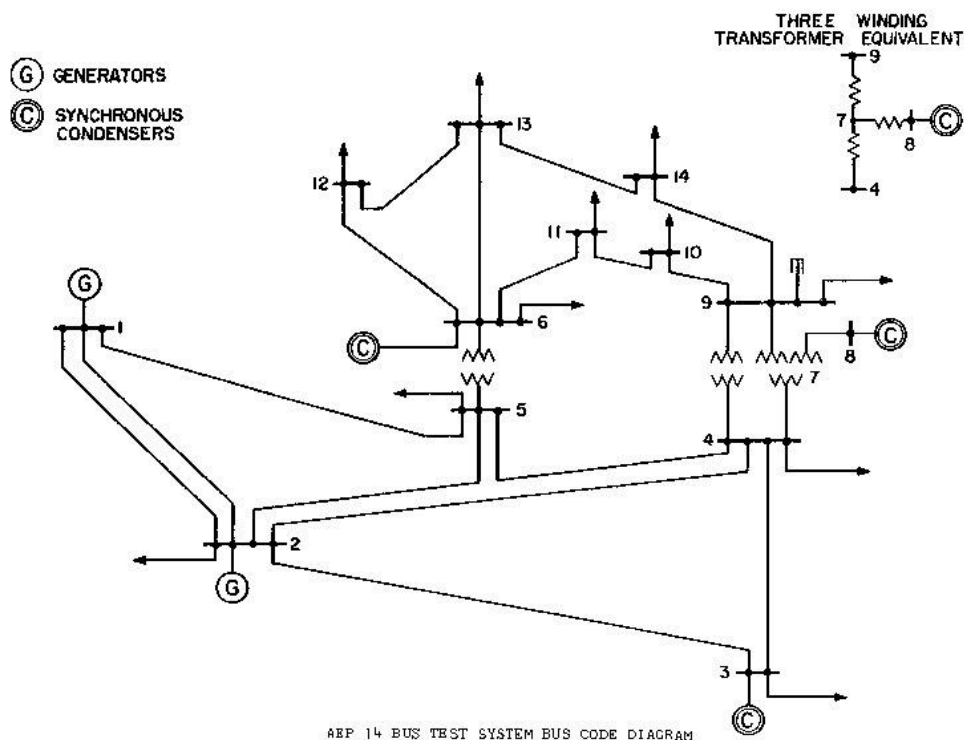


Figura 3.2. Representación esquemática de la red IEEE 14-buses. [7]

Tabla 3.4. "Standard IEEE 14-Bus Test System Circuit Data".

Rama no.	Desde el Bus	Al Bus	Resistencia	Reactancia	Semisusceptancia	Transformador TAP
			R	X	B/2	a
			p.u.	p.u.	p.u.	p.u.
1	1	2	0,0194	0,0592	0,0264	0
2	1	5	0,054	0,223	0,0246	0
3	2	3	0,047	0,1979	0,0219	0
4	2	4	0,0581	0,1763	0,0187	0
5	2	5	0,0569	0,1738	0,01695	0
6	3	4	0,067	0,171	0,0173	0
7	4	5	0,0134	0,0421	0,0064	0
8	4	7	0	0,209	0	1
9	4	9	0	0,5562	0	1
10	5	6	0	0,2522	0	1
11	6	11	0,095	0,1989	0	0
12	6	12	0,1229	0,2557	0	0
13	6	13	0,0661	0,1302	0	0
14	7	8	0	0,1762	0	1

15	7	9	0	0,011	0	1
16	9	10	0,0318	0,0845	0	0
17	9	14	0,127	0,2703	0	0
18	10	11	0,082	0,192	0	0
19	12	13	0,2209	0,1999	0	0
20	13	14	0,1709	0,3479	0	0

Tabla 3.5. "Standard IEEE 14-Bus Test System Bus Data with generator Q limits".

Bus no.	Tipo de bus	Tensión de bus		Generación de potencia		Demanda de potencia		Límites de Q generación		Admitancia shunt	
		V	δ	P _{Gi}	Q _{Gi}	P _{Li}	Q _{Li}	Q _{min}	Q _{max}	G _{sh}	B _{sh}
		p.u.	deg.	MW	Mvar	MW	Mvar	Mvar	Mvar	p.u.	p.u.
1	1	1,06	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	2	1,045	0	18,3	5,857	0	0	-500	500	0	0
3	3	1	0	0	0	119	8,762	0	0	0,0002	0,502
4	3	1	0	0	0	47,79	3,9	0	500	0	0
5	3	1	0	0	0	7,599	1,599	0	0	0	0
6	2	1,07	0	11,2	44,2	0	0	-30	30	0	0
7	3	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	3	1	0	0	0	0	12,9	0	0	0,0023	0,1325
9	3	1	0	0	0	29,499	16,599	0	0	0	0,0633
10	3	1	0	0	0	9	5,799	0	0	0	0
11	3	1	0	0	0	3,501	1,8	0	500	0	0
12	3	1	0	0	0	6,099	1,599	0	0	0	0
13	3	1	0	0	0	13,5	5,799	0	0	0	0
14	3	1	0	0	0	14,901	5,001	0	0	0	0
Base MVA = 100											

Tabla 3.6. "Standard IEEE 14-Bus Test System Bus Data without generator Q limits".

Bus no.	Tipo de bus	Tensión de bus		Generación de potencia		Demanda de potencia		Límites de Q generación		Admitancia shunt	
		V	δ	P _{Gi}	Q _{Gi}	P _{Li}	Q _{Li}	Q _{min}	Q _{max}	G _{sh}	B _{sh}
		p.u.	deg.	MW	Mvar	MW	Mvar	Mvar	Mvar	p.u.	p.u.
1	1	1,06	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	2	1,045	0	18,3	5,857	0	0	-500	500	0	0
3	3	1	0	0	0	119	8,762	0	0	0,0002	0,502
4	3	1	0	0	0	47,79	3,9	0	500	0	0

5	3	1	0	0	0	7,599	1,599	0	0	0	0
6	2	1,07	0	11,2	44,2	0	0	-500	500	0	0
7	3	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	3	1	0	0	0	0	12,9	0	0	0,0023	0,1325
9	3	1	0	0	0	29,499	16,599	0	0	0	0,0633
10	3	1	0	0	0	9	5,799	0	0	0	0
11	3	1	0	0	0	3,501	1,8	0	500	0	0
12	3	1	0	0	0	6,099	1,599	0	0	0	0
13	3	1	0	0	0	13,5	5,799	0	0	0	0
14	3	1	0	0	0	14,901	5,001	0	0	0	0
Base MVA = 100											

Tabla 3.7. "Original IEEE 14-Bus Test System Circuit Data".

Rama no.	Desde el Bus	Al Bus	Resistencia	Reactancia	Semisusceptancia	Transformador TAP
			R	X	B/2	a
			p.u.	p.u.	p.u.	p.u.
1	1	2	0,01938	0,05917	0,0264	0
2	1	5	0,05403	0,22304	0,0219	0
3	2	3	0,04699	0,19797	0,0187	0
4	2	4	0,05811	0,17632	0,0246	0
5	2	5	0,05695	0,17388	0,017	0
6	3	4	0,06701	0,17103	0,0173	0
7	4	5	0,01335	0,04211	0,0064	0
8	4	7	0	0,20912	0	0,978
9	4	9	0	0,55618	0	0,969
10	5	6	0	0,25202	0	0,932
11	6	11	0,09498	0,1989	0	0
12	6	12	0,12291	0,25581	0	0
13	6	13	0,06615	0,13027	0	0
14	7	8	0	0,17615	0	1
15	7	9	0	0,11001	0	1
16	9	10	0,03181	0,0845	0	0
17	9	14	0,12711	0,27038	0	0
18	10	11	0,08205	0,19207	0	0
19	12	13	0,22092	0,19988	0	0
20	13	14	0,17093	0,34802	0	0

Tabla 3.8. "Original IEEE 14-Bus Test System Bus Data with generator Q limits".

Bus no.	Tipo de bus	Tensión de bus		Generación de potencia		Demanda de potencia		Límites de Q generación		Admitancia shunt	
		V	δ	P _{Gi}	Q _{Gi}	P _{Li}	Q _{Li}	Q _{min}	Q _{max}	G _{sh}	B _{sh}
		p.u.	deg.	MW	Mvar	MW	Mvar	Mvar	Mvar	p.u.	p.u.
1	1	1,060	0	232,4	-16,9	0	0	0	0	0	0
2	2	1,045	0	40	42,4	21,7	12,7	-40	50	0	0
3	2	1,010	0	0	23,4	94,2	19	0	40	0	0
4	3	1	0	0	0	47,8	-3,9	0	0	0	0
5	3	1	0	0	0	7,6	1,6	0	0	0	0
6	2	1,07	0	0	12,2	11,2	7,5	-6	24	0	0
7	3	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	2	1,09	0	0	17,4	0	0	-6	24	0	0
9	3	1	0	0	0	29,5	16,6	0	0	0	0,19
10	3	1	0	0	0	9	5,8	0	0	0	0
11	3	1	0	0	0	3,5	1,8	0	0	0	0
12	3	1	0	0	0	6,1	1,6	0	0	0	0
13	3	1	0	0	0	13,5	5,8	0	0	0	0
14	3	1	0	0	0	14,9	5	0	0	0	0
Base MVA = 100											

3.1.3. Red IEEE 30-buses

Al igual que la red IEEE 14-buses esta representa una parte del sistema eléctrico estadounidense del medio oeste del territorio, aunque, en este caso es de diciembre de 1961. Asimismo, los datos fueron proporcionados por Iraj Dabbagchi de AEP e introducidas en las bases de datos comunes del IEEE por Rich Christie de la Universidad de Washington, en agosto de 1993.

A continuación, se exponen todos los datos tanto de los buses, como de las líneas, en las siguientes tablas, junto con una muestra de la representación esquemática del sistema de 30 buses en la figura 3.3. Estos datos también han sido extraídos de [4] y, asimismo, también se han corregido ciertos parámetros de sus líneas respecto a los valores originales de dicha red, ya que aparecía algún error de transcripción y, por lo tanto, eso conllevará a pequeñas diferencias en los resultados finales del estudio del autor con los de este. En adición, posteriormente a los datos característicos estándar, se expone mediante tablas los datos originales de la red, los cuales aparecen y han sido extraídos de la referencia [7].

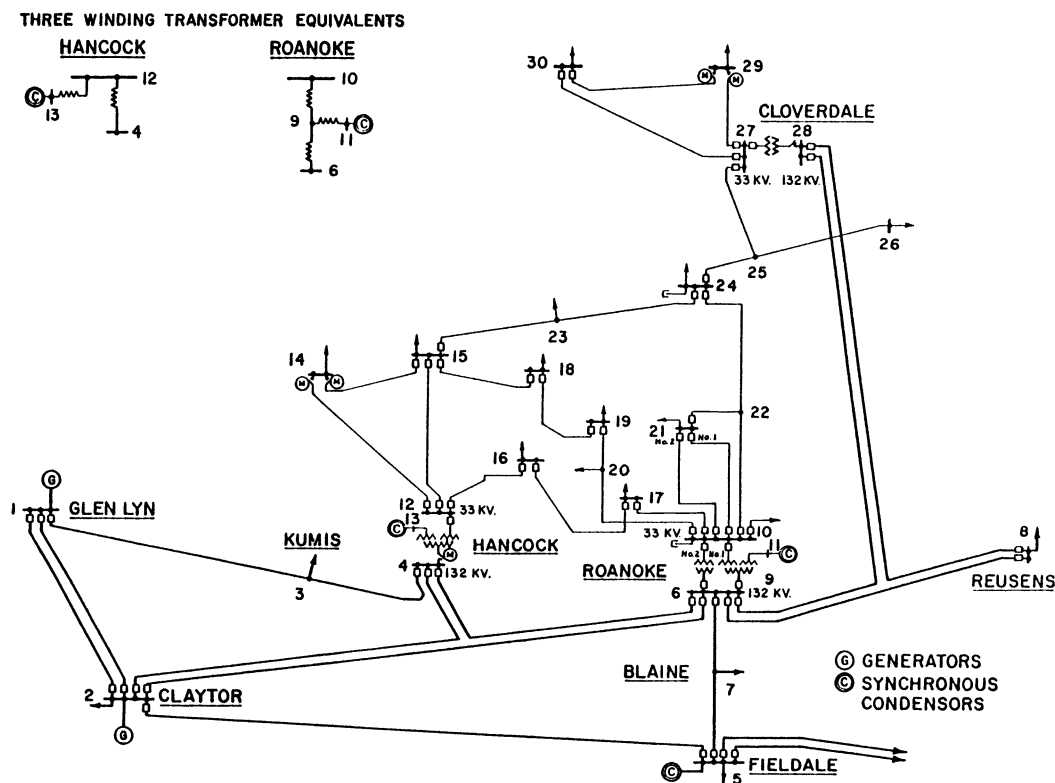


Figura 3.3. Representación esquemática de la red IEEE 30-buses. [7]

Tabla 3.9. "Standard IEEE 30-Bus Test System Circuit Data".

Rama no.	Desde el Bus	Al Bus	Resistencia	Reactancia	Semisusceptancia	Transformador TAP
			R	X	B/2	a
			p.u.	p.u.	p.u.	p.u.
1	1	2	0,0192	0,0575	0,0528	0
2	1	3	0,0452	0,1652	0,0408	0
3	2	4	0,057	0,1737	0,0368	0
4	3	4	0,0132	0,0379	0,0084	0
5	2	5	0,0472	0,1983	0,0418	0
6	2	6	0,0581	0,1763	0,0374	0
7	4	6	0,0119	0,0414	0,009	0
8	5	7	0,046	0,116	0,0204	0
9	6	7	0,0267	0,082	0,017	0
10	6	8	0,012	0,042	0,009	0
11	6	9	0	0,208	0	1
12	6	10	0	0,556	0	1
13	9	11	0	0,208	0	0

14	9	10	0	0,11	0	0
15	4	12	0	0,256	0	1
16	12	13	0	0,14	0	0
17	12	14	0,1231	0,2559	0	0
18	12	15	0,0662	0,1304	0	0
19	12	16	0,0945	0,1987	0	0
20	14	15	0,221	0,1997	0	0
21	16	17	0,0524	0,1923	0	0
22	15	18	0,107	0,2185	0	0
23	18	19	0,0639	0,1292	0	0
24	19	20	0,034	0,068	0	0
25	10	20	0,0936	0,209	0	0
26	10	17	0,0324	0,0845	0	0
27	10	21	0,0348	0,0749	0	0
28	10	22	0,0727	0,1499	0	0
29	21	22	0,0116	0,0236	0	0
30	15	23	0,1	0,202	0	0
31	22	24	0,115	0,179	0	0
32	23	24	0,132	0,27	0	0
33	24	25	0,1885	0,3292	0	0
34	25	26	0,2544	0,38	0	0
35	25	27	0,1093	0,2087	0	0
36	27	28	0	0,396	0	1
37	27	29	0,2198	0,4153	0	0
38	27	30	0,3202	0,6027	0	0
39	29	30	0,2399	0,4533	0	0
40	8	28	0,0636	0,2	0,0428	0
41	6	28	0,0169	0,0599	0,013	0

Tabla 3.10. "Standard IEEE 30-Bus Test System Bus Data with generator Q limits".

Bus no.	Tipo de bus	Tensión de bus		Generación de potencia		Demanda de potencia		Límites de Q generación		Admitancia shunt	
		V	δ	P _{Gi}	Q _{Gi}	P _{Li}	Q _{Li}	Q _{min}	Q _{max}	G _{sh}	B _{sh}
		p.u.	deg.	MW	Mvar	MW	Mvar	Mvar	Mvar	p.u.	p.u.
1	1	1,05	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	2	1,0338	0	57,56	2,47	21,7	12,7	-500	500	0	0
3	3	1	0	0	0	2,4	1,2	0	0	0	0

4	3	1	0	0	0	7,6	1,6	0	0	0	0
5	2	1,0058	0	24,56	22,57	94,2	19	-500	500	0	0
6	3	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	3	1	0	0	0	62,8	10,9	0	0	0	0
8	2	1,023	0	35	34,84	80	30	-500	500	0	0
9	3	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	3	1	0	0	0	5,8	2	0	0	0	0,19
11	2	1,0913	0	17,93	30,78	0	0	-20	20	0	0
12	3	1	0	0	0	11,2	7,5	0	0	0	0
13	2	1,0883	0	16,91	37,83	0	0	-30	30	0	0
14	3	1	0	0	0	6,2	1,6	0	0	0	0
15	3	1	0	0	0	8,2	2,5	0	0	0	0
16	3	1	0	0	0	3,5	1,8	0	0	0	0
17	3	1	0	0	0	9	5,8	0	0	0	0
18	3	1	0	0	0	3,2	0,9	0	0	0	0
19	3	1	0	0	0	9,5	3,4	0	0	0	0
20	3	1	0	0	0	2,2	0,7	0	0	0	0
21	3	1	0	0	0	17,5	11,2	0	0	0	0
22	3	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
23	3	1	0	0	0	3,2	1,6	0	0	0	0
24	3	1	0	0	0	8,7	6,7	0	0	0	0,04
25	3	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
26	3	1	0	0	0	3,5	2,3	0	0	0	0
27	3	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
28	3	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
29	3	1	0	0	0	2,4	0,9	0	0	0	0
30	3	1	0	0	0	10,6	1,9	0	0	0	0
Base MVA = 100											

Tabla 3.11. "Standard IEEE 30-Bus Test System Bus Data without generator Q limits".

Bus no.	Tipo de bus	Tensión de bus		Generación de potencia		Demanda de potencia		Límites de Q generación		Admitancia shunt	
		V	δ	P _{Gi}	Q _{Gi}	P _{Li}	Q _{Li}	Q _{min}	Q _{max}	G _{sh}	B _{sh}
		p.u.	deg.	MW	Mvar	MW	Mvar	Mvar	Mvar	p.u.	p.u.
1	1	1,05	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	2	1,0338	0	57,56	2,47	21,7	12,7	-500	500	0	0
3	3	1	0	0	0	2,4	1,2	0	0	0	0

4	3	1	0	0	0	7,6	1,6	0	0	0	0
5	2	1,0058	0	24,56	22,57	94,2	19	-500	500	0	0
6	3	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	3	1	0	0	0	62,8	10,9	0	0	0	0
8	2	1,023	0	35	34,84	80	30	-500	500	0	0
9	3	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	3	1	0	0	0	5,8	2	0	0	0	0,19
11	2	1,0913	0	17,93	30,78	0	0	-50	500	0	0
12	3	1	0	0	0	11,2	7,5	0	0	0	0
13	2	1,0883	0	16,91	37,83	0	0	-500	500	0	0
14	3	1	0	0	0	6,2	1,6	0	0	0	0
15	3	1	0	0	0	8,2	2,5	0	0	0	0
16	3	1	0	0	0	3,5	1,8	0	0	0	0
17	3	1	0	0	0	9	5,8	0	0	0	0
18	3	1	0	0	0	3,2	0,9	0	0	0	0
19	3	1	0	0	0	9,5	3,4	0	0	0	0
20	3	1	0	0	0	2,2	0,7	0	0	0	0
21	3	1	0	0	0	17,5	11,2	0	0	0	0
22	3	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
23	3	1	0	0	0	3,2	1,6	0	0	0	0
24	3	1	0	0	0	8,7	6,7	0	0	0	0,04
25	3	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
26	3	1	0	0	0	3,5	2,3	0	0	0	0
27	3	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
28	3	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
29	3	1	0	0	0	2,4	0,9	0	0	0	0
30	3	1	0	0	0	10,6	1,9	0	0	0	0
Base MVA = 100											

Tabla 3.12. "Original IEEE 30-Bus Test System Circuit Data".

Rama no.	Desde el Bus	Al Bus	Resistencia	Reactancia	Semisusceptancia	Transformador TAP
			R	X	B/2	a
			p.u.	p.u.	p.u.	p.u.
1	1	2	0,0192	0,0575	0,0528	0
2	1	3	0,0452	0,1652	0,0408	0
3	2	4	0,057	0,1737	0,0368	0

4	3	4	0,0132	0,0379	0,0084	0
5	2	5	0,0472	0,1983	0,0418	0
6	2	6	0,0581	0,1763	0,0374	0
7	4	6	0,0119	0,0414	0,009	0
8	5	7	0,046	0,116	0,0204	0
9	6	7	0,0267	0,082	0,017	0
10	6	8	0,012	0,042	0,009	0
11	6	9	0	0,208	0	0,978
12	6	10	0	0,556	0	0,969
13	9	11	0	0,208	0	0
14	9	10	0	0,11	0	0
15	4	12	0	0,256	0	0,932
16	12	13	0	0,14	0	0
17	12	14	0,1231	0,2559	0	0
18	12	15	0,0662	0,1304	0	0
19	12	16	0,0945	0,1987	0	0
20	14	15	0,221	0,1997	0	0
21	16	17	0,0524	0,1923	0	0
22	15	18	0,1073	0,2185	0	0
23	18	19	0,0639	0,1292	0	0
24	19	20	0,034	0,068	0	0
25	10	20	0,0936	0,209	0	0
26	10	17	0,0324	0,0845	0	0
27	10	21	0,0348	0,0749	0	0
28	10	22	0,0727	0,1499	0	0
29	21	22	0,0116	0,0236	0	0
30	15	23	0,1	0,202	0	0
31	22	24	0,115	0,179	0	0
32	23	24	0,132	0,27	0	0
33	24	25	0,1885	0,3292	0	0
34	25	26	0,2544	0,38	0	0
35	25	27	0,1093	0,2087	0	0
36	28	27	0	0,396	0	0,968
37	27	29	0,2198	0,4153	0	0
38	27	30	0,3202	0,6027	0	0
39	29	30	0,2399	0,4533	0	0
40	8	28	0,0636	0,2	0,0428	0
41	6	28	0,0169	0,0599	0,013	0

Tabla 3.13. "Original IEEE 30-Bus Test System Bus Data with generator Q limits".

Bus no.	Tipo de bus	Tensión de bus		Generación de potencia		Demanda de potencia		Límites de Q generación		Admitancia shunt	
		V	δ	P _{Gi}	Q _{Gi}	P _{Li}	Q _{Li}	Q _{min}	Q _{max}	G _{sh}	B _{sh}
		p.u.	deg.	MW	Mvar	MW	Mvar	Mvar	Mvar	p.u.	p.u.
1	1	1,060	0	260,2	-16,1	0	0	0	0	0	0
2	2	1,045	0	40	50	21,7	12,7	-40	50	0	0
3	3	1	0	0	0	2,4	1,2	0	0	0	0
4	3	1	0	0	0	7,6	1,6	0	0	0	0
5	2	1,010	0	0	37	94,2	19	-40	40	0	0
6	3	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	3	1	0	0	0	22,8	10,9	0	0	0	0
8	2	1,010	0	0	37,3	30	30	-10	40	0	0
9	3	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	3	1	0	0	0	5,8	2	0	0	0	0,19
11	2	1,082	0	0	16,2	0	0	-6	24	0	0
12	3	1	0	0	0	11,2	7,5	0	0	0	0
13	2	1,071	0	0	10,6	0	0	-6	24	0	0
14	3	1	0	0	0	6,2	1,6	0	0	0	0
15	3	1	0	0	0	8,2	2,5	0	0	0	0
16	3	1	0	0	0	3,5	1,8	0	0	0	0
17	3	1	0	0	0	9	5,8	0	0	0	0
18	3	1	0	0	0	3,2	0,9	0	0	0	0
19	3	1	0	0	0	9,5	3,4	0	0	0	0
20	3	1	0	0	0	2,2	0,7	0	0	0	0
21	3	1	0	0	0	17,5	11,2	0	0	0	0
22	3	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
23	3	1	0	0	0	3,2	1,6	0	0	0	0
24	3	1	0	0	0	8,7	6,7	0	0	0	0,043
25	3	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
26	3	1	0	0	0	3,5	2,3	0	0	0	0
27	3	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
28	3	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
29	3	1	0	0	0	2,4	0,9	0	0	0	0
30	3	1	0	0	0	10,6	1,9	0	0	0	0
Base MVA = 100											

3.2. Formulación método matrices de incidencia

Tras tener una base de conocimiento respecto a cómo se calcula y formula la matriz de admitancias de bus de una red determinada, todo ello a partir de las impedancias de la misma y como se encuentran conexas entre sus buses, se llega a la conclusión de que dicho método puede resultar muy pesado, además de que puede propiciar a errores involuntarios, en el caso de estar trabajando con redes muy grandes y complejas, debido a la gran cantidad de elementos que aparecen y a todas las conexiones que puedan existir entre los componentes de la misma. Es por ello que surge el reto de investigar sobre un método alternativo que permita reducir el volumen de trabajo, además, de que también conlleve una disminución considerable del error humano en el proceso de creación de dicha matriz. Así pues, tras llevar a cabo la búsqueda y análisis, se decide optar por el llamado método de las matrices de incidencia [8][9].

Este nuevo método estudiado se va a explicar y a exponer mediante un ejemplo, llevado a cabo paso a paso, partiendo de la red IEEE 3-bus, para así, posteriormente, tener argumentado de donde proviene el resultado obtenido de dicha red, que se expondrá en su correspondiente apartado.

- *Ejemplo explicativo: Obtención de la matriz de admitancias (Y_{BUS}) de la red IEEE 3-bus mediante el método de las matrices de incidencias.*

Para dar comienzo, se parte de la representación gráfica de la red, dónde se encuentran los valores de impedancia y admitancia de línea y de las admitancias de los generadores.

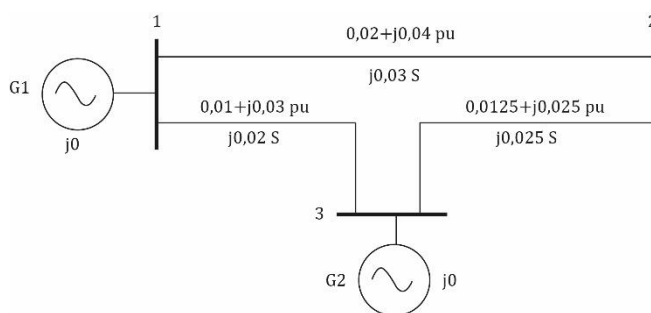


Figura 3.4. Representación esquemática de la red IEEE 3-buses.

A continuación, se vuelve a representar el sistema, pero en este caso, como una simplificación del circuito eléctrico equivalente, siendo los nodos la representación equivalente de los buses y, por otro lado, las admitancias entre dichos nodos equivaldrían a las líneas de transporte, además, las admitancias conectadas a tierra representan las patas de π de las líneas y/o, bien, las admitancias de los generadores.

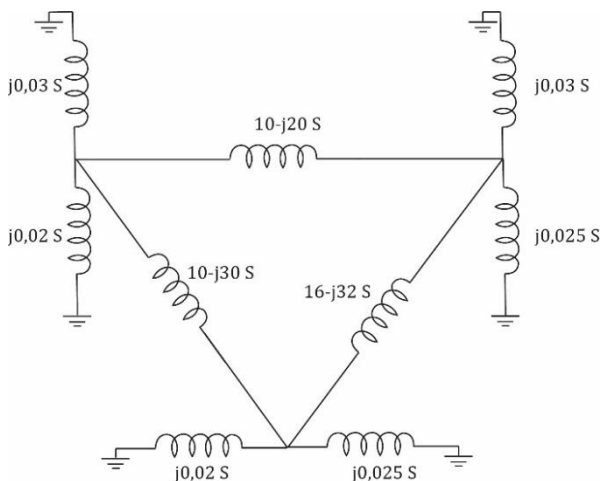


Figura 3.5. Esquema equivalente de admitancias de la red IEEE 3-buses.

Seguidamente, siguiendo la misma estructura que la figura anterior del circuito equivalente de la red con sus admitancias representadas, se numeran cada uno de los nodos, tomando el nodo de referencia, el de tierra, con el número 0, y el resto de nodos, toman valores del “1” al “b”, siendo “b” el número total de nodos que hay en dicha red. Por otro lado, cada una de las ramas que conforman las líneas se deben ordenar alfabéticamente, partiendo de la “a” y en orden alfabético se van colocando las demás letras hasta que las “e” ramas tengan cada una su letra (e ≡ número total de ramas). Por último, se debe definir un sentido a cada rama, es decir, hacia donde se determina que circula el flujo en un comienzo, para así determinar una referencia inicial y conocer desde donde parte la rama y donde termina. Por ejemplo, la rama “b” se debe decidir si su sentido es de “1” a “2” o de “2” a “1”, dicha elección no influirá en el resultado, ya que es únicamente se trata de definir un sentido arbitrario, siendo irrelevante el sentido que se escoja, por lo tanto, se decide que toma sentido “1-2”. Dicho esto, el esquema equivalente queda tal como se muestra en la siguiente figura.

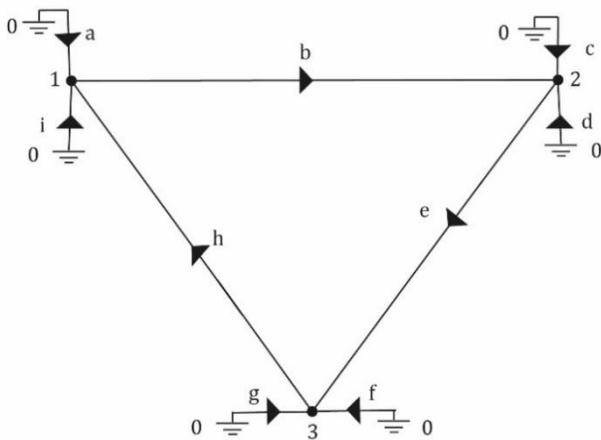


Figura 3.6. Esquema de los nudos y ramas, junto con su sentido, de la red IEEE 3-buses.

Para completar la primera parte del proceso, la cual esta principalmente basada en la elaboración de diagramas y esquemas, falta por llevar a cabo la unión en un mismo nodo de todas las ramas que se encuentran conectadas por uno de sus extremos a tierra, es decir, hacer confluir cada una de las ramas que parten desde uno de los nodos "0" en un mismo punto del gráfico, nombrada también con "0". Por lo tanto, se vuelve a representar el circuito inicial, quedando tal que así:

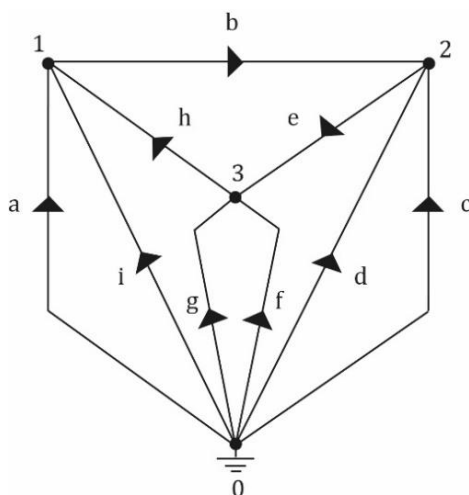


Figura 3.7. Esquema unificado de los nodos y ramas, junto con su sentido, de la red IEEE 3-buses.

A partir de este instante, tras obtener este último esquema, el cual proviene de la red inicial de 3 buses, se van a crear tres matrices partiendo de una serie de reglas. Para empezar, se crea la matriz nombrada como $[\hat{A}]$, dicha matriz tiene unas dimensiones de "e" filas por "n" columnas ($n \equiv$ número total de nodos, teniendo en cuenta el "0"). Las filas representan las ramas del esquema, que en este caso van de "a" hasta "i", y las columnas parten de "0" a "3".

Tras tener dimensionada la matriz $[\hat{A}]$, se va a proceder a completarla. El proceso que se sigue es el siguiente, si te encuentras en la rama "x" y dicha rama parte del nodo "y" y termina en el nodo "z", con el sentido marcado como "y-z", en la columna de "y" se colocará un 1 y en la columna de "z" un -1 y, para terminar de completar la fila de "x", en el resto de sus columnas vacías colocar un 0. Es decir, desde donde se ha marcado que parte dicha línea irá un 1 y hacia donde se ha estipulado que llega irá un -1, terminándose el proceso colocando un 0 en el resto de columnas que no se hayan completado en esa fila. Como ejemplo, sobre el caso práctico trabajado, si se escoge la rama "a", podemos observar en la figura anterior que esta rama va de "0" a "1", con sentido "0-1", por lo tanto, en la fila de "a" de la matriz $[\hat{A}]$, se deberá colocar en la columna perteneciente al "0" un 1 y en la del "1" un -1 y, por último, faltaría colocar un 0 en la columna "2" y otro en la "3". Como segundo ejemplo aclaratorio, se escoge la rama "h", dicha rama toma el sentido de "3" a "1", por lo tanto, hay que situarse en la fila "h" de la matriz $[\hat{A}]$ y en la columna "3" irá un 1 y en la "1" un -1 y, además, en las columnas "0" y "2" se colocaría un 0 en cada una. Por lo tanto, siguiendo este proceso, se termina rellenando toda la matriz, quedando como resultado el expuesto a continuación.

$$\hat{A} = \begin{array}{c|cccc} e \backslash n & 0 & 1 & 2 & 3 \\ \hline - & - & - & - & - \\ a & 1 & -1 & 0 & 0 \\ b & 0 & 1 & -1 & 0 \\ c & 1 & 0 & -1 & 0 \\ d & 1 & 0 & -1 & 0 \\ e & 0 & 0 & 1 & -1 \\ f & 1 & 0 & 0 & -1 \\ g & 1 & 0 & 0 & -1 \\ h & 0 & -1 & 0 & 1 \\ i & 1 & -1 & 0 & 0 \end{array}$$

El siguiente paso tras tener definida la matriz $[\hat{A}]$, es el de obtener la matriz $[A]$ junto con su matriz traspuesta $[A^t]$. Dicha matriz $[A]$ se obtiene suprimiendo la primera columna de la matriz anterior, es decir, eliminando la columna del nodo 0. Así pues, queda una matriz de “e” filas y “b” columnas. Ambas matrices se muestran a continuación.

$$A = \begin{array}{c|ccc} e \backslash b & 1 & 2 & 3 \\ \hline - & - & - & - \\ a & -1 & 0 & 0 \\ b & 1 & -1 & 0 \\ c & 0 & -1 & 0 \\ d & 0 & -1 & 0 \\ e & 0 & 1 & -1 \\ f & 0 & 0 & -1 \\ g & 0 & 0 & -1 \\ h & -1 & 0 & 1 \\ i & -1 & 0 & 0 \end{array}$$

$$A^t = \begin{array}{c|ccccccccc} b \backslash e & a & b & c & d & e & f & g & h & i \\ \hline - & - & - & - & - & - & - & - & - & - \\ 1 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & -1 \\ 2 & 0 & -1 & -1 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 3 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & -1 & -1 & 1 & 0 \end{array}$$

Para obtener la última matriz, con tal de ya poder calcular la matriz de admitancias deseada, se debe realizar lo siguiente. Tal como se conoce, cada rama presenta una admitancia, la cual ya se encuentra previamente calculada y esquematizada en la segunda figura de ésta explicación. Por lo tanto, para crear la matriz $[y]$ se trata de diagonalizar en una matriz cuadrada de “e x e” los valores de las admitancias de cada rama, siguiendo el orden alfabético de dichas admitancias en el respectivo lugar de la diagonal de la matriz. Es decir, la admitancia de la rama “a” (y_a) irá en la posición $[y(1,1)]$, la admitancia de la rama “b”, en la posición $[y(2,2)]$, la de la rama “c” en la posición $[y(3,3)]$ y así de manera sucesiva hasta tener todas las admitancias de la red introducidas diagonalmente en la matriz $[y]$. Dicha matriz, completamente dimensionada, se muestra a continuación.

$e \setminus e$	a	b	c	d	e	f	g	h	i
$-$	$-$	$-$	$-$	$-$	$-$	$-$	$-$	$-$	$-$
a	$j0,03$	0	0	0	0	0	0	0	0
b	0	$10 - j20$	0	0	0	0	0	0	0
c	0	0	$j0,03$	0	0	0	0	0	0
$y = d$	0	0	0	$j0,025$	0	0	0	0	0
e	0	0	0	0	$16 - j32$	0	0	0	0
f	0	0	0	0	0	$j0,025$	0	0	0
g	0	0	0	0	0	0	$j0,02$	0	0
h	0	0	0	0	0	0	0	$10 - j30$	0
i	0	0	0	0	0	0	0	0	$j0,02$

Ya como último paso, tras obtener las tres matrices necesarias $[A]$, $[A^t]$ y $[y]$, se lleva a cabo el siguiente cálculo, el cual permite obtener de manera directa la matriz de admitancias de bus. Así pues, a continuación, se muestra tanto el cálculo como el resultado obtenido del proceso llevado a cabo. Además, a modo de determinación para conocer si el proceso descrito ha conllevado obtener el resultado correcto, cabe decir que dicho valor ha sido comparado con el ya obtenido mediante el otro método del que se partía y, por lo tanto, se puede afirmar como correcto.

$$Y_{BUS} = [A^t] \cdot [y] \cdot [A] =$$

$$= \begin{bmatrix} -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & -1 \\ 0 & -1 & -1 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & -1 & -1 & 1 & 0 \end{bmatrix} \cdot$$

$$\begin{bmatrix} j0,03 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 10 - j20 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & j0,03 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & j0,025 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 16 - j32 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & j0,025 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & j0,02 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 10 - j30 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & j0,02 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 1 & -1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \\ 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & -1 \\ -1 & 0 & 1 \\ -1 & 0 & 0 \end{bmatrix};$$

$$Y_{BUS} = \begin{bmatrix} 20 - j49,95 & -10 + j20 & -10 + j30 \\ -10 + j20 & 26 - j51,945 & -16 + j32 \\ -10 + j30 & -16 + j32 & 26 - j61,955 \end{bmatrix};$$

3.2.1. Programación con *Matlab* de la automatización de la Y_{BUS}

Para agilizar todavía más el proceso de cálculo de la matriz de admitancias de bus, ya que la obtención de la misma es el primer paso para llevar a cabo estudios en redes eléctricas de potencia, como podría ser el estudio de flujo de cargas fundamental, se ha llevado a cabo la programación, con el software matemático *Matlab* [10], de un código tal que a partir de introducir

en una hoja de cálculo (“.xlsx”) todos los valores de admitancias e impedancias, de la manera en como se muestra en la figura 3.8, éste código calcule automáticamente la matriz Y_{BUS} . Dicho programa informático está fundamentado principalmente en el método de las matrices de incidencia, tal como se ha explicado paso a paso a lo largo de este apartado. Adicionalmente, en este código se ha tenido en cuenta todos los parámetros posibles que se pueden encontrar en los SEP, es decir, tiene en cuenta las impedancias de las líneas, las admitancias shunt y, en especial, el factor de regulación de los transformadores (en este caso con el modelo de “a”), haciendo así que la formulación de la matriz de incidencia con éste programa personal sea de manera completa, genérica y detallada, ya que tiene en cuenta todas las posibilidades existentes.

A continuación, se muestra como debe ser la entrada de datos en la hoja de cálculo y, además, la respuesta que se recibe como salida tras ejecutar el archivo, todo ello a partir de los datos de la red IEEE 3-bus, tal como se ha hecho en la explicación anterior. El código completo se encuentra en el Anexo A.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
1	DATOS LÍNEAS n3 (Branch y Bus)										
2											
3	<i>Bus no.</i>	<i>Gsh</i>	<i>Bsh</i>		<i>Branch no.</i>	<i>From Bus</i>	<i>To Bus</i>	<i>R</i>	<i>X</i>	<i>B/2</i>	<i>a</i>
4	1	0	0		1	1	2	0,02	0,04	0,03	0
5	2	0	0		2	1	3	0,01	0,03	0,02	0
6	3	0	0		3	2	3	0,0125	0,025	0,025	0

Figura 3.8. Entrada de datos en hoja de cálculo para obtener matriz de admitancias de buses.

```

Ybus =

    20.0000 -49.9500i -10.0000 +20.0000i -10.0000 +30.0000i
   -10.0000 +20.0000i  26.0000 -51.9450i -16.0000 +32.0000i
   -10.0000 +30.0000i -16.0000 +32.0000i  26.0000 -61.9550i
    
```

Figura 3.9. Matriz de admitancias de bus como resultado del código programado en Matlab.

Para concluir, tras tener el conocimiento de éste nuevo método de obtención de la matriz de admitancias de bus mediante matrices de incidencia, además de su posterior programación informática en un código de *Matlab*, se lleva a cabo el cálculo de las matrices de admitancia de bus respectivas a las redes estándar IEEE estudiadas, en los siguientes subapartados. Todos los resultados se mostrarán en formato de figura extraídas directamente de *Matlab*.

3.2.2. Y_{BUS} característica de la red IEEE 3-buses

Para la red estándar IEEE 3-bus, se introducen los siguientes datos y se obtiene la matriz de admitancias de tamaño 3x3 correspondiente. Cabe recordar, que dicha matriz ya había sido expuesta y argumentada anteriormente.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
1	DATOS LÍNEAS n3 (Branch y Bus)										
2											
3	Bus no.	Gsh	Bsh		Branch no.	From Bus	To Bus	R	X	B/2	a
4	1	0	0		1	1	2	0,02	0,04	0,03	0
5	2	0	0		2	1	3	0,01	0,03	0,02	0
6	3	0	0		3	2	3	0,0125	0,025	0,025	0

Figura 3.10. Datos de entrada de las líneas y buses de la red ESTÁNDAR IEEE 3-buses.

Ybus =

```

20.0000 -49.9500i -10.0000 +20.0000i -10.0000 +30.0000i
-10.0000 +20.0000i 26.0000 -51.9450i -16.0000 +32.0000i
-10.0000 +30.0000i -16.0000 +32.0000i 26.0000 -61.9550i
    
```

Figura 3.11. Matriz de admitancias de bus de la red ESTÁNDAR IEEE 3-buses.

3.2.3. Y_{bus} característica de la red IEEE 14-buses

Para la red estándar IEEE 14-bus, se introducen los siguientes datos y se obtiene la matriz de admitancias de tamaño 14x14 correspondiente.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
1	DATOS LÍNEAS n14 (Branch y Bus)										
2											
3	Bus no.	Gsh	Bsh		Branch no.	From Bus	To Bus	R	X	B/2	a
4	1	0	0		1	1	2	0,0194	0,0592	0,0264	0
5	2	0	0		2	1	5	0,054	0,223	0,0246	0
6	3	0,0002	0,502		3	2	3	0,047	0,1979	0,0219	0
7	4	0	0		4	2	4	0,0581	0,1763	0,0187	0
8	5	0	0		5	2	5	0,0569	0,1738	0,01695	0
9	6	0	0		6	3	4	0,067	0,171	0,0173	0
10	7	0	0		7	4	5	0,0134	0,0421	0,0064	0
11	8	0,0023	0,1325		8	4	7	0	0,209	0	1
12	9	0	0,0633		9	4	9	0	0,5562	0	1
13	10	0	0		10	5	6	0	0,2522	0	1
14	11	0	0		11	6	11	0,095	0,1989	0	0
15	12	0	0		12	6	12	0,1229	0,2557	0	0
16	13	0	0		13	6	13	0,0661	0,1302	0	0
17	14	0	0		14	7	8	0	0,1762	0	1
18					15	7	9	0	0,011	0	1
19					16	9	10	0,0318	0,0845	0	0
20					17	9	14	0,127	0,2703	0	0
21					18	10	11	0,082	0,192	0	0
22					19	12	13	0,2209	0,1999	0	0
23					20	13	14	0,1709	0,3479	0	0

Figura 3.12. Datos de entrada de las líneas y buses de la red ESTÁNDAR IEEE 14-buses.

Ybus =

1.0e+02 *

Columns 1 through 6

0.0602 - 0.1944i	-0.0500 + 0.1525i	0.0000 + 0.0000i	0.0000 + 0.0000i	-0.0103 + 0.0424i	0.0000 + 0.0000i
-0.0500 + 0.1525i	0.0952 - 0.3027i	-0.0114 + 0.0478i	-0.0169 + 0.0512i	-0.0170 + 0.0520i	0.0000 + 0.0000i
0.0000 + 0.0000i	-0.0114 + 0.0478i	0.0312 - 0.0931i	-0.0199 + 0.0507i	0.0000 + 0.0000i	0.0000 + 0.0000i
0.0000 + 0.0000i	-0.0169 + 0.0512i	-0.0199 + 0.0507i	0.1054 - 0.3829i	-0.0686 + 0.2157i	0.0000 + 0.0000i
-0.0103 + 0.0424i	-0.0170 + 0.0520i	0.0000 + 0.0000i	-0.0686 + 0.2157i	0.0959 - 0.3492i	0.0000 + 0.0397i
0.0000 + 0.0000i	0.0000 + 0.0000i	0.0000 + 0.0000i	0.0000 + 0.0000i	0.0000 + 0.0397i	0.0658 - 0.1734i
0.0000 + 0.0000i	0.0000 + 0.0000i	0.0000 + 0.0000i	0.0000 + 0.0478i	0.0000 + 0.0000i	0.0000 + 0.0000i
0.0000 + 0.0000i	0.0000 + 0.0000i	0.0000 + 0.0000i	0.0000 + 0.0000i	0.0000 + 0.0000i	0.0000 + 0.0000i
0.0000 + 0.0000i	0.0000 + 0.0000i	0.0000 + 0.0000i	0.0000 + 0.0180i	0.0000 + 0.0000i	0.0000 + 0.0000i
0.0000 + 0.0000i	0.0000 + 0.0000i	0.0000 + 0.0000i	0.0000 + 0.0000i	0.0000 + 0.0000i	0.0000 + 0.0000i
0.0000 + 0.0000i	0.0000 + 0.0000i	0.0000 + 0.0000i	0.0000 + 0.0000i	0.0000 + 0.0000i	-0.0196 + 0.0409i
0.0000 + 0.0000i	0.0000 + 0.0000i	0.0000 + 0.0000i	0.0000 + 0.0000i	0.0000 + 0.0000i	-0.0153 + 0.0318i
0.0000 + 0.0000i	0.0000 + 0.0000i	0.0000 + 0.0000i	0.0000 + 0.0000i	0.0000 + 0.0000i	-0.0310 + 0.0611i
0.0000 + 0.0000i	0.0000 + 0.0000i	0.0000 + 0.0000i	0.0000 + 0.0000i	0.0000 + 0.0000i	0.0000 + 0.0000i

Columns 7 through 12

0.0000 + 0.0000i	0.0000 + 0.0000i	0.0000 + 0.0000i	0.0000 + 0.0000i	0.0000 + 0.0000i	0.0000 + 0.0000i
0.0000 + 0.0000i	0.0000 + 0.0000i	0.0000 + 0.0000i	0.0000 + 0.0000i	0.0000 + 0.0000i	0.0000 + 0.0000i
0.0000 + 0.0000i	0.0000 + 0.0000i	0.0000 + 0.0000i	0.0000 + 0.0000i	0.0000 + 0.0000i	0.0000 + 0.0000i
0.0000 + 0.0478i	0.0000 + 0.0000i	0.0000 + 0.0180i	0.0000 + 0.0000i	0.0000 + 0.0000i	0.0000 + 0.0000i
0.0000 + 0.0000i	0.0000 + 0.0000i	0.0000 + 0.0000i	0.0000 + 0.0000i	0.0000 + 0.0000i	0.0000 + 0.0000i
0.0000 + 0.0000i	0.0000 + 0.0000i	0.0000 + 0.0000i	0.0000 + 0.0000i	-0.0196 + 0.0409i	-0.0153 + 0.0318i
0.0000 - 1.0137i	0.0000 + 0.0568i	0.0000 + 0.9091i	0.0000 + 0.0000i	0.0000 + 0.0000i	0.0000 + 0.0000i
0.0000 + 0.0568i	0.0000 - 0.0554i	0.0000 + 0.0000i	0.0000 + 0.0000i	0.0000 + 0.0000i	0.0000 + 0.0000i
0.0000 + 0.9091i	0.0000 + 0.0000i	0.0533 - 1.0604i	-0.0390 + 0.1037i	0.0000 + 0.0000i	0.0000 + 0.0000i
0.0000 + 0.0000i	0.0000 + 0.0000i	-0.0390 + 0.1037i	0.0578 - 0.1477i	-0.0188 + 0.0440i	0.0000 + 0.0000i
0.0000 + 0.0000i	0.0000 + 0.0000i	0.0000 + 0.0000i	-0.0188 + 0.0440i	0.0384 - 0.0850i	0.0000 + 0.0000i
0.0000 + 0.0000i	0.0000 + 0.0000i	0.0000 + 0.0000i	0.0000 + 0.0000i	0.0000 + 0.0000i	0.0402 - 0.0543i
0.0000 + 0.0000i	0.0000 + 0.0000i	0.0000 + 0.0000i	0.0000 + 0.0000i	0.0000 + 0.0000i	-0.0249 + 0.0225i
0.0000 + 0.0000i	0.0000 + 0.0000i	-0.0142 + 0.0303i	0.0000 + 0.0000i	0.0000 + 0.0000i	0.0000 + 0.0000i

Columns 13 through 14

0.0000 + 0.0000i	0.0000 + 0.0000i
0.0000 + 0.0000i	0.0000 + 0.0000i
0.0000 + 0.0000i	0.0000 + 0.0000i
0.0000 + 0.0000i	0.0000 + 0.0000i
0.0000 + 0.0000i	0.0000 + 0.0000i
-0.0310 + 0.0611i	0.0000 + 0.0000i
0.0000 + 0.0000i	0.0000 + 0.0000i
0.0000 + 0.0000i	0.0000 + 0.0000i
0.0000 + 0.0000i	-0.0142 + 0.0303i
0.0000 + 0.0000i	0.0000 + 0.0000i
0.0000 + 0.0000i	0.0000 + 0.0000i
-0.0249 + 0.0225i	0.0000 + 0.0000i
0.0673 - 0.1067i	-0.0114 + 0.0232i
-0.0114 + 0.0232i	0.0256 - 0.0535i

Figura 3.13. Matriz de admitancias de bus de la red ESTÁNDAR IEEE 14-buses.

3.2.4. Y_{bus} característica de la red IEEE 30-buses

Para la red estándar IEEE 30-bus, se introducen los siguientes datos y se obtiene la matriz de admitancias de tamaño 30x30 correspondiente.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
1	DATOS LÍNEAS n30 (Branch y Bus)										
2											
3	<i>Bus no.</i>	<i>Gsh</i>	<i>Bsh</i>		<i>Branch no.</i>	<i>From Bus</i>	<i>To Bus</i>	<i>R</i>	<i>X</i>	<i>B/2</i>	<i>a</i>
4	1	0	0		1	1	2	0,0192	0,0575	0,0528	0
5	2	0	0		2	1	3	0,0452	0,1652	0,0408	0
6	3	0	0		3	2	4	0,057	0,1737	0,0368	0
7	4	0	0		4	3	4	0,0132	0,0379	0,0084	0
8	5	0	0		5	2	5	0,0472	0,1983	0,0418	0
9	6	0	0		6	2	6	0,0581	0,1763	0,0374	0
10	7	0	0		7	4	6	0,0119	0,0414	0,009	0
11	8	0	0		8	5	7	0,046	0,116	0,0204	0
12	9	0	0		9	6	7	0,0267	0,082	0,017	0
13	10	0	0,19		10	6	8	0,012	0,042	0,009	0
14	11	0	0		11	6	9	0	0,208	0	1
15	12	0	0		12	6	10	0	0,556	0	1
16	13	0	0		13	9	11	0	0,208	0	0
17	14	0	0		14	9	10	0	0,11	0	0
18	15	0	0		15	4	12	0	0,256	0	1
19	16	0	0		16	12	13	0	0,14	0	0
20	17	0	0		17	12	14	0,1231	0,2559	0	0
21	18	0	0		18	12	15	0,0662	0,1304	0	0
22	19	0	0		19	12	16	0,0945	0,1987	0	0
23	20	0	0		20	14	15	0,221	0,1997	0	0
24	21	0	0		21	16	17	0,0524	0,1923	0	0
25	22	0	0		22	15	18	0,107	0,2185	0	0
26	23	0	0		23	18	19	0,0639	0,1292	0	0
27	24	0	0,04		24	19	20	0,034	0,068	0	0
28	25	0	0		25	10	20	0,0936	0,209	0	0
29	26	0	0		26	10	17	0,0324	0,0845	0	0
30	27	0	0		27	10	21	0,0348	0,0749	0	0
31	28	0	0		28	10	22	0,0727	0,1499	0	0
32	29	0	0		29	21	22	0,0116	0,0236	0	0
33	30	0	0		30	15	23	0,1	0,202	0	0
34					31	22	24	0,115	0,179	0	0
35					32	23	24	0,132	0,27	0	0
36					33	24	25	0,1885	0,3292	0	0
37					34	25	26	0,2544	0,38	0	0
38					35	25	27	0,1093	0,2087	0	0
39					36	27	28	0	0,396	0	1
40					37	27	29	0,2198	0,4153	0	0
41					38	27	30	0,3202	0,6027	0	0
42					39	29	30	0,2399	0,4533	0	0
43					40	8	28	0,0636	0,2	0,0428	0
44					41	6	28	0,0169	0,0599	0,013	0

Figura 3.14. Datos de entrada de las líneas y buses de la red ESTÁNDAR IEEE 30-buses.

Columns 25 through 30

0.0000 + 0.0000i	0.0000 + 0.0000i	0.0000 + 0.0000i	0.0000 + 0.0000i	0.0000 + 0.0000i	0.0000 + 0.0000i
0.0000 + 0.0000i	0.0000 + 0.0000i	0.0000 + 0.0000i	0.0000 + 0.0000i	0.0000 + 0.0000i	0.0000 + 0.0000i
0.0000 + 0.0000i	0.0000 + 0.0000i	0.0000 + 0.0000i	0.0000 + 0.0000i	0.0000 + 0.0000i	0.0000 + 0.0000i
0.0000 + 0.0000i	0.0000 + 0.0000i	0.0000 + 0.0000i	0.0000 + 0.0000i	0.0000 + 0.0000i	0.0000 + 0.0000i
0.0000 + 0.0000i	0.0000 + 0.0000i	0.0000 + 0.0000i	0.0000 + 0.0000i	0.0000 + 0.0000i	0.0000 + 0.0000i
0.0000 + 0.0000i	0.0000 + 0.0000i	0.0000 + 0.0000i	0.0000 + 0.0000i	-4.3628 + 15.4636i	0.0000 + 0.0000i
0.0000 + 0.0000i	0.0000 + 0.0000i	0.0000 + 0.0000i	0.0000 + 0.0000i	0.0000 + 0.0000i	0.0000 + 0.0000i
0.0000 + 0.0000i	0.0000 + 0.0000i	0.0000 + 0.0000i	0.0000 + 0.0000i	-1.4440 + 4.5408i	0.0000 + 0.0000i
0.0000 + 0.0000i	0.0000 + 0.0000i	0.0000 + 0.0000i	0.0000 + 0.0000i	0.0000 + 0.0000i	0.0000 + 0.0000i
0.0000 + 0.0000i	0.0000 + 0.0000i	0.0000 + 0.0000i	0.0000 + 0.0000i	0.0000 + 0.0000i	0.0000 + 0.0000i
0.0000 + 0.0000i	0.0000 + 0.0000i	0.0000 + 0.0000i	0.0000 + 0.0000i	0.0000 + 0.0000i	0.0000 + 0.0000i
0.0000 + 0.0000i	0.0000 + 0.0000i	0.0000 + 0.0000i	0.0000 + 0.0000i	0.0000 + 0.0000i	0.0000 + 0.0000i
0.0000 + 0.0000i	0.0000 + 0.0000i	0.0000 + 0.0000i	0.0000 + 0.0000i	0.0000 + 0.0000i	0.0000 + 0.0000i
0.0000 + 0.0000i	0.0000 + 0.0000i	0.0000 + 0.0000i	0.0000 + 0.0000i	0.0000 + 0.0000i	0.0000 + 0.0000i
0.0000 + 0.0000i	0.0000 + 0.0000i	0.0000 + 0.0000i	0.0000 + 0.0000i	0.0000 + 0.0000i	0.0000 + 0.0000i
0.0000 + 0.0000i	0.0000 + 0.0000i	0.0000 + 0.0000i	0.0000 + 0.0000i	0.0000 + 0.0000i	0.0000 + 0.0000i
0.0000 + 0.0000i	0.0000 + 0.0000i	0.0000 + 0.0000i	0.0000 + 0.0000i	0.0000 + 0.0000i	0.0000 + 0.0000i
0.0000 + 0.0000i	0.0000 + 0.0000i	0.0000 + 0.0000i	0.0000 + 0.0000i	0.0000 + 0.0000i	0.0000 + 0.0000i
0.0000 + 0.0000i	0.0000 + 0.0000i	0.0000 + 0.0000i	0.0000 + 0.0000i	0.0000 + 0.0000i	0.0000 + 0.0000i
0.0000 + 0.0000i	0.0000 + 0.0000i	0.0000 + 0.0000i	0.0000 + 0.0000i	0.0000 + 0.0000i	0.0000 + 0.0000i
0.0000 + 0.0000i	0.0000 + 0.0000i	0.0000 + 0.0000i	0.0000 + 0.0000i	0.0000 + 0.0000i	0.0000 + 0.0000i
0.0000 + 0.0000i	0.0000 + 0.0000i	0.0000 + 0.0000i	0.0000 + 0.0000i	0.0000 + 0.0000i	0.0000 + 0.0000i
0.0000 + 0.0000i	0.0000 + 0.0000i	0.0000 + 0.0000i	0.0000 + 0.0000i	0.0000 + 0.0000i	0.0000 + 0.0000i
0.0000 + 0.0000i	0.0000 + 0.0000i	0.0000 + 0.0000i	0.0000 + 0.0000i	0.0000 + 0.0000i	0.0000 + 0.0000i
0.0000 + 0.0000i	0.0000 + 0.0000i	0.0000 + 0.0000i	0.0000 + 0.0000i	0.0000 + 0.0000i	0.0000 + 0.0000i
0.0000 + 0.0000i	0.0000 + 0.0000i	0.0000 + 0.0000i	0.0000 + 0.0000i	0.0000 + 0.0000i	0.0000 + 0.0000i
0.0000 + 0.0000i	0.0000 + 0.0000i	0.0000 + 0.0000i	0.0000 + 0.0000i	0.0000 + 0.0000i	0.0000 + 0.0000i
0.0000 + 0.0000i	0.0000 + 0.0000i	0.0000 + 0.0000i	0.0000 + 0.0000i	0.0000 + 0.0000i	0.0000 + 0.0000i
0.0000 + 0.0000i	0.0000 + 0.0000i	0.0000 + 0.0000i	0.0000 + 0.0000i	0.0000 + 0.0000i	0.0000 + 0.0000i
0.0000 + 0.0000i	0.0000 + 0.0000i	0.0000 + 0.0000i	0.0000 + 0.0000i	0.0000 + 0.0000i	0.0000 + 0.0000i
0.0000 + 0.0000i	0.0000 + 0.0000i	0.0000 + 0.0000i	0.0000 + 0.0000i	0.0000 + 0.0000i	0.0000 + 0.0000i
-1.3099 + 2.2876i	0.0000 + 0.0000i	0.0000 + 0.0000i	0.0000 + 0.0000i	0.0000 + 0.0000i	0.0000 + 0.0000i
4.4957 - 7.8650i	-1.2165 + 1.8171i	-1.9693 + 3.7602i	0.0000 + 0.0000i	0.0000 + 0.0000i	0.0000 + 0.0000i
-1.2165 + 1.8171i	1.2165 - 1.8171i	0.0000 + 0.0000i	0.0000 + 0.0000i	0.0000 + 0.0000i	0.0000 + 0.0000i
-1.9693 + 3.7602i	0.0000 + 0.0000i	3.6523 - 9.4604i	0.0000 + 2.5253i	-0.9955 + 1.8810i	-0.6875 + 1.2940i
0.0000 + 0.0000i	0.0000 + 0.0000i	0.0000 + 2.5253i	5.8068 - 22.4738i	0.0000 + 0.0000i	0.0000 + 0.0000i
0.0000 + 0.0000i	0.0000 + 0.0000i	-0.9955 + 1.8810i	0.0000 + 0.0000i	1.9076 - 3.6044i	-0.9121 + 1.7234i
0.0000 + 0.0000i	0.0000 + 0.0000i	-0.6875 + 1.2940i	0.0000 + 0.0000i	-0.9121 + 1.7234i	1.5995 - 3.0173i

Figura 3.15. Matriz de admitancias de bus de la red ESTÁNDAR IEEE 30-buses.

4. Estudio del flujo de cargas fundamental en redes IEEE n-buses

Con tal de someter a estudio y análisis las redes expuestas en apartados anteriores, a continuación, se detallará el procedimiento pertinente, el cual se debe realizar paso a paso, para así obtener un completo estudio del flujo de cargas fundamental (FLF) de una red eléctrica de potencia. Por consiguiente, se examinarán cada una de las redes anteriores con tal de exponer el resultado de sus estudios de flujo de cargas fundamental, aunque, por cada SEP, existirán dos variantes, las cuales vienen dadas según si se tienen o no en cuenta los límites de generación de potencia reactiva de los generadores conectados a los buses PV.

El estudio de flujo de cargas fundamental parte con el objetivo principal de determinar cuál debe ser la potencia que debe suministrar cada uno de los generadores de la red, con tal de poder atender la demanda de potencia requerida por las cargas conectadas al sistema, por lo tanto, implicará adecuar el reparto de carga entre las unidades generadoras.

Adicionalmente, tal como aparece especificado en [11], dicho estudio proporciona el conocimiento de:

- Tensiones de nudo o bus.
- Potencia suministrada por cada unidad generadora.
- Flujo de potencia en cada componente de la red.
- Rendimiento de la red.
- Efecto de cualquier contingencia, como la pérdida parcial de generación o la desconexión de una línea.

Dicha información resulta muy útil en estudios de seguridad, estabilidad o planificación.

El estudio completo viene definido en tres partes fundamentales:

1. *Formulación.* Modelizar matemáticamente todos los parámetros para así describir las ecuaciones que muestran las relaciones entre potencias y tensiones de la red.
2. *Resolución.* Mediante un método numérico resolver el sistema de ecuaciones resultante del procedimiento de formulación de la misma, con tal de determinar las tensiones de bus (módulo y ángulo).
3. *Otras determinaciones.* Tras conocer el valor que toma el vector de tensión de bus, calcular y determinar:
 - a. Potencia suministrada por parte de los generadores.
 - b. Flujo de potencia en cada elemento de la red.
 - c. Rendimiento y pérdidas de la red.

Por último, para poder definitivamente dar comienzo al primer paso del estudio, se formulan tres hipótesis de partida, tal como se indica en [11]:

- Los generadores trifásicos suministran a la red una terna de tensiones simétrica y equilibrada de secuencia directa.
- Las cargas conectadas a la red son trifásicas y/o monofásicas distribuidas de forma equilibrada.
- La red está en funcionamiento en régimen sinusoidal permanente, trabajando a frecuencia fundamental.

Dicho estudio se lleva a cabo y se exponen los resultados en unidades de p.u.

4.1. Formulación del problema de flujo de cargas fundamental

El primer paso a dar, es el de clasificar los buses de la red según su tipología (Slack, PV o PQ), mediante el análisis e identificación de sus variables incógnita, tal como ya se ha explicado en el apartado 2.1.5.

En segundo lugar, se ha de conocer todos los datos de los componentes de la red pasiva, es decir, los modelos eléctricos de líneas aéreas y transformadores, para así, posteriormente, trabajarlo y obtener la matriz de admitancias de bus característica. Todos los pasos en cuestión se muestran detallados e implementados en el apartado anterior para cada una de las redes estudiadas.

4.1.1. Definición y clasificación de las variables

Tras conocer la matriz Y_{BUS} se definen tres variables características de cada bus:

- *Tensión de bus* (V). Tensión entre el bus i y el bus de referencia.
- *Intensidad de bus* (I). Intensidad neta inyectada a la red des del bus i . Es la diferencia entre la generada y la demanda ($I = I_G - I_D$).
- *Potencia de bus* ($S = V \cdot I^*$). Potencia neta inyectada a la red des del bus i . Es la diferencia entre la generada y la demanda ($S = S_G - S_D$).

A partir de las variables anteriores se formulan y asignan las siguientes seis variables principales para cada uno de los buses:

- Módulo de la tensión: V_i
- Argumento de la tensión: δ
- Potencia activa generada: P_{Gi}
- Potencia reactiva generada: Q_{Gi}
- Potencia activa demandada: P_{Di}
- Potencia reactiva demandada: Q_{Di}

Además, según las consideraciones particulares que se hagan al estudio de flujo de cargas, hay que tener también en cuenta las siguientes variables asociadas a los buses:

- Límite mínimo de potencia reactiva de generación: Q_{min}

- Límite máximo de potencia reactiva de generación: Q_{max}
- Factor de regulación de los transformadores TAP: a

Todas ellas se clasifican según su tipología y naturaleza:

Tabla 4.1. Clasificación de las variables características de los buses. [11]

Variables		
No controlables	De control	De estado
<i>Variables cuyo valor viene fijado por el usuario o consumidor.</i>	<i>Variables sobre las que se tiene control y que pueden ser utilizadas para controlar las restantes variables.</i>	<i>Variables que permiten calcular el estado de una red.</i>
P_{Di}, Q_{Di}	$Q_{min}, Q_{max}, a, P_{Gi}, Q_{Gi}$ y V_i de ciertas unidades generadoras	V_i y δ_i

4.1.2. Ecuaciones de potencia

La relación entre las variables de los respectivos buses viene dada por las siguientes ecuaciones:

- Intensidad de bus (de la ecuación de admitancias de bus):

$$\underline{I}_i = \sum_{k=1}^n \underline{Y}_{ik} \cdot \underline{V}_k \tag{Eq. 4.1}$$

- Potencia de bus:

$$P_i + j \cdot Q_i = \underline{S}_i = \underline{V}_i \cdot \underline{I}_i^* \tag{Eq. 4.2}$$

Donde sí se sustituye la primera con la segunda se obtiene:

- Ecuación compleja de potencia de bus:

$$P_i + j \cdot Q_i = \underline{S}_i = \underline{V}_i \cdot \left(\sum_{k=1}^n \underline{Y}_{ik} \cdot \underline{V}_k \right)^* \tag{Eq. 4.3}$$

Asimismo, si se trabaja la expresión anterior y, seguidamente, se descompone en parte real e imaginaria, queda tal que así:

- Ecuaciones reales de potencia de bus:

$$P_i = V_i \cdot \sum_{k=1}^n V_k \cdot (G_{ik} \cdot \cos(\delta_i - \delta_k) + B_{ik} \cdot \sin(\delta_i - \delta_k)) \tag{Eq. 4.4}$$

$$Q_i = V_i \cdot \sum_{k=1}^n V_k \cdot (G_{ik} \cdot \sin(\delta_i - \delta_k) - B_{ik} \cdot \cos(\delta_i - \delta_k)) \tag{Eq. 4.5}$$

A las dos anteriores ecuaciones, ecuación 4.4 y 4.5, se les determina como las ecuaciones principales y básicas de potencia del flujo de carga fundamental. Entonces, se entiende que por cada bus existen dos ecuaciones de potencia, por lo tanto, para un SEP con “n” buses habrán “2·n”

ecuaciones de potencia. Seguidamente, analizando ambas ecuaciones se puede observar que hay presentes cuatro variables, por lo tanto, “ $4 \cdot n$ ” variables por cada red. Por consiguiente, tal como se menciona en el apartado 2.1.5, cada tipología de bus presenta unas u otras variables como incógnita o como dato, esto conlleva a que por cada bus aparezcan dos variables de dato y dos variables de incógnita. Entonces, partiendo de dos incógnitas por bus, dónde únicamente existen dos ecuaciones, implica que el sistema de ecuaciones sea resoluble, ya que hay las mismas ecuaciones que incógnitas. Así pues, ya que el bus Slack se toma como el de referencia y su vector de tensión es conocido, así como también son conocidos los módulos de las tensiones en los r buses PV, una red de “ n ” buses siempre tendrá “ $2 \cdot n - r - 2$ ” incógnitas de tensión reales para “ $2 \cdot n - r - 2$ ” ecuaciones reales.

4.2. Resolución del problema de flujo de cargas fundamental

Tras llegar a éste punto del estudio del flujo de cargas fundamental se debe haber obtenido los puntos siguientes, con la finalidad de poder garantizar la continuidad del estudio en este apartado denominado como resolución.

- ✓ Clasificación de los buses de la red (Slack, PV o PQ).
- ✓ Cálculo de la matriz de admitancias de bus.
- ✓ Conocimiento sobre la formulación del problema de flujo de cargas.

Entonces, a continuación, tras conocer el principio fundamental del cual parte el estudio del flujo de cargas (formulación del problema de flujo de cargas) y tras tener realizados los dos primeros aspectos mencionados, se procede a detallar, mediante dos métodos numéricos distintos, Gauss-Seidel (GS) y Newton-Raphson (NR), los cuales se llevarán a comparación al final de este apartado, la determinación de las tensiones de bus (módulo y argumento) desconocidas con la ayuda de la formulación particular de cada uno de los métodos iterativos, donde cabe decir que, ambos tienen de base las ecuaciones de potencia de bus, y se requiere de éstos métodos debido a que las mismas conllevan a sistemas de ecuaciones no lineales. Por lo tanto, el objetivo de la resolución del problema de flujo de cargas es el de hallar los vectores de tensión que restan como desconocidos, para que en el paso posterior de este estudio (otras determinaciones del problema del flujo de cargas fundamental) se puedan calcular las incógnitas del SEP restantes.

Con todo esto, se procede a detallar el procedimiento que describen los métodos numéricos de GS y NR, dónde únicamente se mostrará el modelo matemático iterativo específicamente aplicado a las redes eléctricas de potencia. Además, se argumentarán dentro de cada método dos modelos o tipos de resolución de la red, es decir, se expone como se resolvería el estudio de flujo de cargas fundamental si se hiciesen dos hipótesis de entrada distintas, siendo estas las siguientes: sin tener en cuenta los límites de generación de potencia reactiva (Q) y teniendo en cuenta los límites de generación de Q . Por lo tanto, se mostrarán ambas variantes del procedimiento de resolución, ya que en éste proyecto es objeto de estudio el resolver las redes IEEE n -buses con ambos modelos.

4.2.1. Método de Gauss-Seidel

El método numérico de Gauss-Seidel aplicado a la resolución en redes eléctricas de potencia, respecto a encontrar las tensiones de todos los buses presenta el siguiente esquema:

(Se diferencian los dos modelos de resolución, sin y con límites de generación de Q)

A. Sin límites de generación de Q:

i. *Estimación inicial:*

$$(\underline{V}_2^{(0)}, \dots, \underline{V}_{r+1}^{(0)}, \underline{V}_{r+2}^{(0)}, \dots, \underline{V}_n^{(0)}) = (V_2 \cdot e^{j \cdot 0}, \dots, V_{r+1} \cdot e^{j \cdot 0}, 1 \cdot e^{j \cdot 0}, \dots, 1 \cdot e^{j \cdot 0}) \quad (\text{Eq. 4.6})$$

[donde... "r" es el número de buses PV presentes en la red]

ii. *Procedimiento iterativo (nueva aproximación):*

A partir de este punto se presentan dos subprocesos, los cuales vienen determinados según qué tipo de bus se esté procesando. Por una parte, encontramos los buses PV, los cuales presentan como variables incógnitas el valor de la potencia reactiva inyectada (Q_i) y el valor del ángulo de tensión (δ_i). Por otro lado, están los buses PQ, de los cuales se conoce como incógnita el vector de tensión de bus \underline{V}_i (módulo y ángulo). Por lo tanto, de cada cual se debe calcular los nuevos valores de las variables que convengan.

- Nudo PV ($i = 2, \dots, r+1$):

$$Q_i^{(m+1)} = \text{Im} \left\{ \underline{V}_i^{(m)} \cdot \left(\underline{Y}_{i1} \cdot \underline{V}_1 + \sum_{k=2}^{i-1} \underline{Y}_{ik} \cdot \underline{V}_k^{(m+1)} + \sum_{k=i}^n \underline{Y}_{ik} \cdot \underline{V}_k^{(m)} \right)^* \right\} \quad (\text{Eq. 4.7})$$

$$\delta_i^{(m+1)} = \arg \left\{ \frac{1}{\underline{Y}_{ii}} \cdot \left[\frac{P_i - j \cdot Q_i^{(m+1)}}{(\underline{V}_i^{(m)})^*} - \underline{Y}_{i1} \cdot \underline{V}_1 - \sum_{k=2}^{i-1} \underline{Y}_{ik} \cdot \underline{V}_k^{(m+1)} - \sum_{k=i+1}^n \underline{Y}_{ik} \cdot \underline{V}_k^{(m)} \right] \right\} \quad (\text{Eq. 4.8})$$

$$\underline{V}_i^{(m+1)} = V_i \cdot e^{j \cdot \delta_i^{(m+1)}} \quad (\text{Eq. 4.9})$$

- Nudos PQ ($i = r+2, \dots, n$):

$$\underline{V}_i^{(m+1)} = \frac{1}{\underline{Y}_{ii}} \cdot \left[\frac{P_i - j \cdot Q_i^{(m+1)}}{(\underline{V}_i^{(m)})^*} - \underline{Y}_{i1} \cdot \underline{V}_1 - \sum_{k=2}^{i-1} \underline{Y}_{ik} \cdot \underline{V}_k^{(m+1)} - \sum_{k=i+1}^n \underline{Y}_{ik} \cdot \underline{V}_k^{(m)} \right] \quad (\text{Eq. 4.10})$$

Entonces, tras obtener los nuevos valores de tensión de los buses PV y PQ, estos se deben someter a una condición con tal de verificar si se pueden aceptar como correctos o no.

iii. Condiciones de parada:

El hecho que confirmará si los nuevos valores de tensión, que se obtienen a partir de los cálculos anteriores, son correctos o no es el de aplicar las siguientes normas, ambas válidas y complementarias, cuyo cálculo debe ser inferior a la tolerancia estipulada en un inicio.

- Norma 2:

$$\sqrt{\sum_{i=2}^n |V_i^{(m+1)} - V_i^{(m)}|^2} < \varepsilon \quad (\text{Eq. 4.11})$$

- Norma infinito:

$$\max_{2 \leq i \leq n} \{ |V_i^{(m+1)} - V_i^{(m)}| \} < \varepsilon \quad (\text{Eq. 4.12})$$

iv. Determinación de la validez:

Tras decidir qué norma usar y llevar a cabo el cálculo pertinente, se compara el valor calculado con el valor de la tolerancia fijado, en caso de ser inferior al de la tolerancia se darían los resultados como buenos, en caso contrario, dichos valores de tensión hallados se tomarían como nueva aproximación inicial y se volvería a repetir todo el procedimiento hasta que finalmente se cumpla la norma, lo cual propiciaría en el cese del proceso iterativo y la obtención de los valores finales del vector de tensión de los buses.

B. Con límites de generación de Q:

El procedimiento iterativo que se debe seguir para este caso es exactamente el mismo que cuando no existen límites de generación, aunque, se debe introducir una variante en el segundo punto del proceso (procedimiento iterativo), en concreto en las ecuaciones de los nudos PV. Por lo tanto, las ecuaciones que se deben resolver vienen condicionadas según el valor de potencia reactiva calculada, si este es mayor que el máximo, menor que el mínimo o se encuentra entre el rango marcado de mínimo y máximo. Así pues, la variante introducida en el proceso de cálculo en los nudos PV quedaría del siguiente modo:

- Nudo PV ($i = 2, \dots, r+1$):

- o Calcular el nuevo valor de Q:

$$Q_i^{(m+1)} = \text{Im} \left\{ \underline{V}_i^{(m)} \cdot \left(\underline{Y}_{i1} \cdot \underline{V}_1 + \sum_{k=2}^{i-1} \underline{Y}_{ik} \cdot \underline{V}_k^{(m+1)} + \sum_{k=i}^n \underline{Y}_{ik} \cdot \underline{V}_k^{(m)} \right)^* \right\} \quad (\text{Eq. 4.13})$$

- Comparar el valor de Q calculada con los límites fijados:

Según que condición cumpla se debe emplear una u otra ecuación para calcular el nuevo vector de tensión en dicho bus, resultado de si cumple o no con los límites.

- Si $Q_i^{\min} \leq Q_i^{(m+1)} \leq Q_i^{\max}$:

Ya que se cumple con los límites no se varía la naturaleza ni las ecuaciones empleadas.

$$\delta_i^{(m+1)} = \arg \left\{ \frac{1}{\underline{Y}_{ii}} \cdot \left[\frac{P_i - j \cdot Q_i^{(m+1)}}{(\underline{V}_i^{(m)})^*} - \underline{Y}_{i1} \cdot \underline{V}_1 - \sum_{k=2}^{i-1} \underline{Y}_{ik} \cdot \underline{V}_k^{(m+1)} - \sum_{k=i+1}^n \underline{Y}_{ik} \cdot \underline{V}_k^{(m)} \right] \right\} \quad (\text{Eq. 4.14})$$

$$\underline{V}_i^{(m+1)} = V_i \cdot e^{j \cdot \delta_i^{(m+1)}} \quad (\text{Eq. 4.15})$$

- Si $Q_i^{(m+1)} \geq Q_i^{\max}$:

Ya que no cumple con el límite superior se debe modificar la naturaleza del bus, es decir, se transforma momentáneamente el bus de PV a PQ, comportando que el valor del módulo de tensión ya no sea dato fijo, sino que se convierte en incógnita y, entonces, objeto de cálculo. Por contraposición, el valor de Q se toma como dato y se fija en el valor de Q_{\max} .

$$\underline{V}_i^{(m+1)} = \frac{1}{\underline{Y}_{ii}} \cdot \left[\frac{P_i - j \cdot Q_i^{\max}}{(\underline{V}_i^{(m)})^*} - \underline{Y}_{i1} \cdot \underline{V}_1 - \sum_{k=2}^{i-1} \underline{Y}_{ik} \cdot \underline{V}_k^{(m+1)} - \sum_{k=i+1}^n \underline{Y}_{ik} \cdot \underline{V}_k^{(m)} \right] \quad (\text{Eq. 4.16})$$

Tras hallar el nuevo valor de tensión, se vuelve a otorgar la condición de bus PV en la siguiente iteración, si precisa, y se prosigue con el procedimiento normal.

- Si $Q_i^{(m+1)} \leq Q_i^{\min}$:

Ya que no cumple con el límite inferior, al igual que en el caso anterior, se debe modificar la naturaleza del bus, transformando momentáneamente el bus de PV a PQ, comportando que el valor del módulo de tensión ya no sea dato fijo, sino que se convierte en incógnita y, entonces, objeto de cálculo. Por contraposición, el valor de Q se toma como dato y se fija en el valor de Q_{\min} .

$$\underline{V}_i^{(m+1)} = \frac{1}{\underline{Y}_{ii}} \cdot \left[\frac{P_i - j \cdot Q_i^{\min}}{(\underline{V}_i^{(m)})^*} - \underline{Y}_{i1} \cdot \underline{V}_1 - \sum_{k=2}^{i-1} \underline{Y}_{ik} \cdot \underline{V}_k^{(m+1)} - \sum_{k=i+1}^n \underline{Y}_{ik} \cdot \underline{V}_k^{(m)} \right] \quad (\text{Eq. 4.17})$$

Tras hallar el nuevo valor de tensión, se vuelve a otorgar la condición de bus PV en la siguiente iteración, si precisa, y se prosigue con el procedimiento normal.

Concluyendo, tras adaptar el proceso iterativo de Gauss-Seidel con esta modificación, se hace partícipe del cálculo a los límites de generación que presenta la apartamenta eléctrica en la realidad, la cual se halla conectada a los buses PV.

4.2.2. Método de Newton-Raphson

El método numérico de Newton-Raphson aplicado a la resolución de redes eléctricas, respecto a encontrar las tensiones de todos los buses, presenta el siguiente esquema:

(Se diferencian los dos modelos de resolución, sin y con límites de generación de Q)

A. Sin límites de generación de Q:

i. *Estimación inicial:*

$$(\delta_2, \dots, \delta_n, V_{r+2}, \dots, V_n)^{(0)} = (0, \dots, 0, 1, \dots, 1) \quad (\text{Eq. 4.18})$$

[donde... "r" es el número de buses PV presentes en la red]

ii. *Procedimiento iterativo (nueva aproximación):*

El esquema principal que toma el proceso del método numérico de NR es el representado con el sistema de ecuaciones matricial mostrado a continuación. Dónde se distingue entre, la matriz Jacobiana ($JF(X^{(m)})$), cuyas constantes vienen dadas de distintas derivadas parciales de las ecuaciones reales de potencia, después, la matriz de diferencia de potencias reales ($F(X^{(m)})$), cuyos valores son la diferencia entre la potencia (P_i o Q_i) ya conocida como dato y las potencias inyectadas calculadas, las cuales son fruto del cálculo de las respectivas ecuaciones (P_i^c o Q_i^c), y, finalmente, la matriz de incrementos ($\Delta X^{(m)}$), cuyos valores son las incógnitas a resolver del sistema de ecuaciones. Los cálculos se desarrollan desde el bus "2" al bus "n".

$$-JF(X^{(m)}) \cdot \Delta X^{(m)} = F(X^{(m)}) \quad (\text{Eq. 4.19})$$

$$\begin{bmatrix} H & N \\ M & L \end{bmatrix}^{(m)} \cdot \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta V/V \end{bmatrix}^{(m)} = \begin{bmatrix} f_{pi} \\ f_{qi} \end{bmatrix}^{(m)} \quad (\text{Eq. 4.20})$$

a. *Matriz de la diferencia de potencias:*

El primer paso a dar es el de dar forma a la matriz de la diferencia de potencias, por lo tanto, se debe llevar a cabo el cálculo mostrado a continuación. Este cálculo implica que se debe calcular la potencia real inyectada en todos los buses y restarla al valor conocido como dato del problema de potencia real inyectada. Por el contrario, únicamente se calcularán las potencias reactivas inyectadas de los buses PQ, ya que solo de éstos se conoce la potencia reactiva inyectada inicial y, por lo tanto, se puede llevar a cabo el cálculo correspondiente de la diferencia de ambos valores.

$$f_{pi} = P_i - P_i^c = P_i - V_i \cdot \sum_{k=1}^n V_k \cdot (G_{ik} \cdot \cos(\delta_i - \delta_k) + B_{ik} \cdot \sin(\delta_i - \delta_k)) = 0; \quad (\text{Eq. 4.21})$$

[i = 2, ..., n]

$$f_{qi} = Q_i - Q_i^c = Q_i - V_i \cdot \sum_{k=1}^n V_k \cdot (G_{ik} \cdot \sin(\delta_i - \delta_k) - B_{ik} \cdot \cos(\delta_i - \delta_k)) = 0 ; \quad (\text{Eq. 4.22})$$

[i = r + 2, ..., n]

b. Matriz Jacobiana:

El segundo paso es el de crear la matriz Jacobiana a partir del cálculo de sus constantes, las cuales, según la posición en la que se encuentren, representan la derivada parcial de P o de Q respecto a V o a δ . Así pues, a continuación, se definen los cuatro sectores de la correspondiente matriz y se explica mediante que valores de que buses se deben calcular.

▪ *Matriz H o J₁:*

Representa la derivada parcial de la potencia real (P_i) respecto al argumento de la tensión (δ_i). Ya que todos los buses tienen como dato inicial la P_i y como incógnita la δ_i , la matriz se completará con las derivadas parciales de los datos correspondientes de todos los buses excepto el Slack y, por lo tanto, tendrá el tamaño "(n-1) x (n-1)".

$$H = J_1 = \frac{\partial P_i}{\partial \delta_i} = \begin{bmatrix} H_{2,2} & \cdots & H_{2,n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ H_{n,2} & \cdots & H_{n,n} \end{bmatrix} \quad (\text{Eq. 4.23})$$

$$H_{i,i} = -Q_i^c - B_{i,i} \cdot V_i^2 \quad (\text{Eq. 4.24})$$

$$H_{i,k} = V_i \cdot V_k \cdot (G_{ik} \cdot \sin(\delta_i - \delta_k) - B_{ik} \cdot \cos(\delta_i - \delta_k)) \quad (\text{Eq. 4.25})$$

▪ *Matriz N o J₂:*

Representa la derivada parcial de la potencia real (P_i) respecto al módulo de la tensión (V_i). Ya que, aunque todos los buses tienen como dato inicial la P_i, únicamente los buses PQ tienen como incógnita la V_i, la matriz se completará con las derivadas parciales de las P_i de todos los buses excepto el Slack respecto a las V_i de los buses PQ y, por lo tanto, tendrá el tamaño "(n-1) x (n-r-1)".

$$N = J_2 = \frac{\partial P_i}{\partial V_i} = \begin{bmatrix} N_{2,r+2} & \cdots & N_{2,n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ N_{n,r+2} & \cdots & N_{n,n} \end{bmatrix} \quad (\text{Eq. 4.26})$$

$$N_{i,i} = P_i^c + G_{i,i} \cdot V_i^2 \quad (\text{Eq. 4.27})$$

$$N_{i,k} = V_i \cdot V_k \cdot (G_{ik} \cdot \cos(\delta_i - \delta_k) + B_{ik} \cdot \sin(\delta_i - \delta_k)) \quad (\text{Eq. 4.28})$$

▪ *Matriz M o J₃:*

Representa la derivada parcial de la potencia reactiva (Q_i) respecto al argumento de la tensión (δ_i). Ya que únicamente los buses PQ tienen como dato inicial la Q_i y, por otro lado, todos los buses

tienen como incógnita la δ_i , la matriz se completará con las derivadas parciales de las Q_i de los buses PQ respecto a las δ_i de todos los buses excepto del Slack y, por lo tanto, tendrá el tamaño “(n-r-1) x (n-1)”.

$$M = J_3 = \frac{\partial Q_i}{\partial \delta_i} = \begin{bmatrix} M_{r+2,2} & \cdots & M_{r+2,n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ M_{n,2} & \cdots & M_{n,n} \end{bmatrix} \quad (\text{Eq. 4.29})$$

$$M_{i,i} = P_i^c - G_{i,i} \cdot V_i^2 \quad (\text{Eq. 4.30})$$

$$M_{i,k} = -N_{i,k} = -V_i \cdot V_k \cdot (G_{ik} \cdot \cos(\delta_i - \delta_k) + B_{ik} \cdot \sin(\delta_i - \delta_k)) \quad (\text{Eq. 4.31})$$

▪ *Matriz L o J₄:*

Representa la derivada parcial de la potencia reactiva (Q_i) respecto al módulo de la tensión (V_i). Ya que únicamente los buses PQ tienen como dato inicial la Q_i y como incógnita la δ_i , la matriz se completará con las derivadas parciales de las Q_i respecto a las δ_i , todo ello de los buses PQ y, por lo tanto, tendrá el tamaño “(n-r-1) x (n-r-1)”.

$$L = J_4 = \frac{\partial Q_i}{\partial V_i} = \begin{bmatrix} L_{r+2,r+2} & \cdots & L_{r+2,n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ L_{n,r+2} & \cdots & L_{n,n} \end{bmatrix} \quad (\text{Eq. 4.32})$$

$$L_{i,i} = Q_i^c - B_{i,i} \cdot V_i^2 \quad (\text{Eq. 4.33})$$

$$L_{i,k} = -H_{i,k} = -V_i \cdot V_k \cdot (G_{ik} \cdot \sin(\delta_i - \delta_k) - B_{ik} \cdot \cos(\delta_i - \delta_k)) \quad (\text{Eq. 4.34})$$

c. *Sistema de ecuaciones matricial resultante:*

Tras crear ambas matrices ya se puede formular el sistema de ecuaciones que rige en la iteración, por lo tanto, quedaría tal que así, dónde el objetivo es aislar los incrementos del argumento y el módulo de tensión.

$$\begin{bmatrix} H_{2,2} & \cdots & H_{2,n} & N_{2,r+2} & \cdots & N_{2,n} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ H_{n,2} & \cdots & H_{n,n} & N_{n,r+2} & \cdots & N_{n,n} \\ M_{r+2,2} & \cdots & M_{r+2,n} & L_{r+2,r+2} & \cdots & L_{r+2,n} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ M_{n,2} & \cdots & M_{n,n} & L_{n,r+2} & \cdots & L_{n,n} \end{bmatrix}^{(m)} \cdot \begin{bmatrix} \Delta\delta_2 \\ \vdots \\ \Delta\delta_n \\ \Delta V_{r+2}/V_{r+2} \\ \vdots \\ \Delta V_n/V_n \end{bmatrix}^{(m)} = \begin{bmatrix} f_{p,2} \\ \vdots \\ f_{p,n} \\ f_{q,r+2} \\ \vdots \\ f_{q,n} \end{bmatrix}^{(m)} \quad (\text{Eq. 4.35})$$

Después de aislar y obtener los valores de dentro de la matriz de incrementos, por un lado, se encuentran los incrementos del argumento de tensión, los cuales ya son el resultado de nuestro problema y, por otro lado, están los valores del incremento de tensión partido el valor de la tensión en esa iteración, así pues, para obtener el valor del incremento se deberá multiplicar dicho resultado por el valor de tensión que tiene ese bus en la iteración actual, para así finalmente obtener el incremento del módulo de tensión que interesa.

Finalmente, tras tener los valores del incremento del módulo y argumento de la tensión, se procede a realizar el siguiente cálculo con tal de obtener los nuevos valores de δ_i y V_i .

$$(\delta_2, \dots, \delta_n, V_{r+2}, \dots, V_n)^{(m+1)} = (\delta_2, \dots, \delta_n, V_{r+2}, \dots, V_n)^{(m)} + (\Delta\delta_2, \dots, \Delta\delta_n, \Delta V_{r+2}, \dots, \Delta V_n)^{(m)} \quad (\text{Eq. 4.36})$$

iii. Condiciones de parada:

Al igual que con GS, el hecho que afirmará si los nuevos valores del vector de tensión, que se obtienen a partir de los cálculos anteriores, son correctos o no, es el de aplicar las siguientes normas, ambas válidas y complementarias, cuyo cálculo debe ser inferior a la tolerancia estipulada en un comienzo.

- Norma 2:

$$\sqrt{\sum_{i=2}^n |\delta_i^{(m+1)} - \delta_i^{(m)}|^2 + \sum_{j=r+2}^n |V_j^{(m+1)} - V_j^{(m)}|^2} < \varepsilon \quad (\text{Eq. 4.37})$$

$$\sqrt{\sum_{i=2}^n |f_{pi}^{(m)} - 0|^2 + \sum_{j=r+2}^n |f_{qj}^{(m)} - 0|^2} < \varepsilon \quad (\text{Eq. 4.38})$$

- Norma infinito:

$$\max_{\substack{2 \leq i \leq n \\ r+2 \leq j \leq n}} \{|\delta_i^{(m+1)} - \delta_i^{(m)}|, |V_j^{(m+1)} - V_j^{(m)}|\} < \varepsilon \quad (\text{Eq. 4.39})$$

$$\max_{\substack{2 \leq i \leq n \\ r+2 \leq j \leq n}} \{|f_{pi}^{(m)} - 0|, |f_{qj}^{(m)} - 0|\} < \varepsilon \quad (\text{Eq. 4.40})$$

iv. Determinación de la validez:

Tras decidir que norma usar y llevar a cabo el cálculo pertinente, se compara el valor calculado con el valor de la tolerancia fijado, en caso de ser inferior al de la tolerancia se darían los resultados como buenos, en caso contrario, dichos valores de módulo y argumento de tensión hallados se tomarían como valores de la nueva aproximación inicial y se volvería a repetir todo el procedimiento hasta que finalmente se cumpla la norma, lo cual propiciaría en el cese del proceso iterativo y la obtención de los valores del vector de tensión de los buses.

B. Con límites de generación de Q:

El procedimiento iterativo que se debe seguir para este caso es exactamente el mismo que cuando no existen límites de generación, aunque, se debe introducir una variante en el proceso.

En primer lugar, tras obtener la primera aproximación de los módulos y argumentos de tensión, se calcula para todos los buses su potencia reactiva calculada (Q_i^c). Entonces, para los buses PV se compara su valor con el de los límites de generación, pudiendo haber los siguientes escenarios:

- Si $Q_i^{\min} \leq Q_i^{(m+1)} \leq Q_i^{\max}$:

Ya que se cumple con los límites no se varía nada del bus "i" y prosigue todo normal.

- Si $Q_i^{(m+1)} \geq Q_i^{\max}$:

Ya que no cumple con el límite superior, se debe modificar la naturaleza del bus, es decir, se transforma momentáneamente el bus de PV a PQ, comportando que el valor del módulo de tensión ya no sea dato fijo, sino que se convierte en incógnita y, entonces, objeto de cálculo. Por contraposición, el valor de Q_i se toma como dato y se fija en el valor de Q_{\max} .

A partir de este instante el bus es PQ, por lo tanto, aparece un bus PQ más en la red y, consecuentemente se debe añadir y/o variar ciertos valores de los cálculos posteriores. Se debe hacer lo siguiente:

- ❖ Calcular la f_{qi} correspondiente y añadirla a la matriz $F(X^{(m)})$.
- ❖ Calcular las nuevas constantes de $JF(X^{(m)})$, ya que la matriz $[N]$ tendrá una columna más, la matriz $[M]$ una fila más y la matriz $[L]$ tanto una fila como una columna más.

Tras hallar el nuevo valor del módulo de tensión, se le vuelve a otorgar la condición de bus PV en la siguiente iteración, si precisa, y se prosigue de nuevo con el procedimiento normal.

- Si $Q_i^{(m+1)} \leq Q_i^{\min}$:

Ya que no cumple con el límite inferior se debe modificar la naturaleza del bus, es decir, se transforma momentáneamente el bus de PV a PQ, comportando que el valor del módulo de tensión ya no sea dato fijo, sino que se convierte en incógnita y, entonces, objeto de cálculo. Por contraposición, el valor de Q_i se toma como dato y se fija en el valor de Q_{\min} .

A partir de este instante el bus es PQ, por lo tanto, aparece un bus PQ más en la red y, consecuentemente se debe añadir y/o variar ciertos valores de los cálculos posteriores. Se debe hacer lo siguiente:

- ❖ Calcular la f_{qi} correspondiente y añadirla a la matriz $F(X^{(m)})$.
- ❖ Calcular las nuevas constantes de $JF(X^{(m)})$, ya que la matriz $[N]$ tendrá una columna más, la matriz $[M]$ una fila más y la matriz $[L]$ tanto una fila como una columna más.

Tras hallar el nuevo valor del módulo de tensión, se le vuelve a otorgar la condición de bus PV en la siguiente iteración, si precisa, y se prosigue de nuevo con el procedimiento normal.

Posteriormente, se prosigue con el procedimiento descrito en el apartado de sin límites de generación y, en el caso de no cumplirse con los límites se hará dicha modificación temporal al esquema de cálculo, para así corregir y reajustar los valores de tensión con tal de garantizar que se respetan los límites de generación de Q.

Para concluir, tras adaptar el proceso iterativo de Newton-Raphson con esta modificación, se hace partícipe del cálculo a los límites de generación que presenta la aparamenta eléctrica en la realidad, la cual se halla conectada a los buses PV.

4.2.3. Comparación GS vs NR

Tras detallar el proceso descrito por ambos métodos se lleva a cabo una breve comparación de ambos, con tal de observar sus diferencias, junto con sus pros y sus contras. Se emplea un “✓” para los aspectos positivos y un “X” los negativos.

Tabla 4.2. Comparación de los métodos de GS y NR.

<i>Gauss-Seidel</i>	<i>Newton-Raphson</i>
✓ Preparación sencilla.	X Preparación compleja y laboriosa.
X El tiempo por iteración se incrementa linealmente con el número de buses de la red.	X El tiempo por iteración se incrementa linealmente con el número de buses de la red.
✓ El tiempo por iteración es inferior al del método de NR.	X El tiempo por iteración es superior al del método de GS.
X Muchas iteraciones para converger a la solución.	✓ Pocas iteraciones son necesarias para converger a la solución.
X El número de iteraciones necesarias para converger se ve incrementado con el número de buses de la red.	✓ El número de iteraciones necesarias para converger a la solución no guarda relación con el número de buses de la red.
X Tiene convergencia lineal, además, presenta problemas de convergencia en redes con una gran cantidad de buses.	✓ Tiene convergencia cuadrática.

Concluyendo, tal como se puede apreciar en la tabla comparativa, el método “a priori” más rápido y que no presentará problemas de convergencia es el de Newton-Raphson, aunque, el que resultará más fácil de programar y preparar será el de Gauss-Seidel. Además, un modo visual de poder observar como NR se presenta como un método numérico donde el número de iteraciones es mucho menor al de GS, es en gráficas de convergencia, las cuales permiten apreciar de un modo más claro todo lo dicho en este apartado, ratificando así sus buenas prestaciones de cálculo. Éstas van a estar presentes en los apartados correspondientes de los estudios posteriores, complementadas con su análisis y sus conclusiones consecuentes.

4.3. Otras determinaciones del problema de flujo de cargas fundamental

Tras finalmente obtener todos los valores de tensión, en módulo y ángulo, se detallan las ecuaciones que permitan hallar los valores de interés de la red, los cuales eran función de las tensiones de bus.

- Potencia suministrada por las unidades generadoras:

- o En nudo Slack ($i = 1$):

$$\underline{S}_i = \underline{V}_i \cdot \left(\sum_{k=1}^n \underline{Y}_{ik} \cdot \underline{V}_k \right)^* \rightarrow S_{Gi} = S_i + S_{Di} \quad (\text{Eq. 4.41})$$

$$P_i = V_i \cdot \sum_{k=1}^n V_k \cdot (G_{ik} \cdot \cos(\delta_i - \delta_k) + B_{ik} \cdot \sin(\delta_i - \delta_k)) \rightarrow P_{Gi} = P_i + P_{Di} \quad (\text{Eq. 4.42})$$

$$Q_i = V_i \cdot \sum_{k=1}^n V_k \cdot (G_{ik} \cdot \sin(\delta_i - \delta_k) - B_{ik} \cdot \cos(\delta_i - \delta_k)) \rightarrow Q_{Gi} = Q_i + Q_{Di} \quad (\text{Eq. 4.43})$$

- o En nudos PV ($i = 2, \dots, r+1$):

$$\underline{Q}_i = \text{Im} \left\{ \underline{V}_i \cdot \left(\sum_{k=1}^n \underline{Y}_{ik} \cdot \underline{V}_k \right)^* \right\} \rightarrow Q_{Gi} = Q_i + Q_{Di} \quad (\text{Eq. 4.44})$$

$$Q_i = V_i \cdot \sum_{k=1}^n V_k \cdot (G_{ik} \cdot \sin(\delta_i - \delta_k) - B_{ik} \cdot \cos(\delta_i - \delta_k)) \rightarrow Q_{Gi} = Q_i + Q_{Di} \quad (\text{Eq. 4.45})$$

- Flujo de potencia en cada componente de la red:

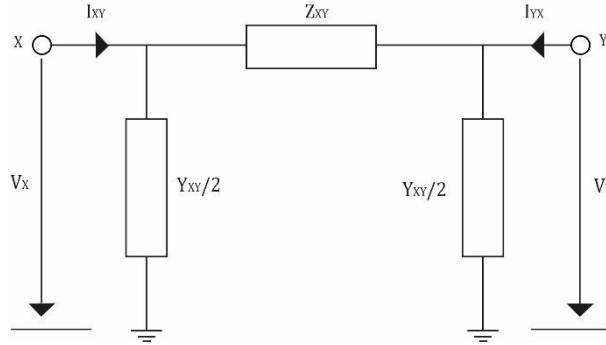


Figura 4.1. Representación de los parámetros influyentes en el flujo de potencia.

$$\underline{S}_{xy} = \underline{V}_x \cdot \underline{I}_{xy}^* = \underline{V}_x \cdot \left(\frac{\underline{V}_x - \underline{V}_y}{\underline{Z}_{xy}} + \frac{\underline{Y}_{xy}}{2} \cdot \underline{V}_x \right)^* \quad (\text{Eq. 4.46})$$

$$\underline{S}_{yx} = \underline{V}_y \cdot \underline{I}_{yx}^* = \underline{V}_y \cdot \left(\frac{\underline{V}_y - \underline{V}_x}{\underline{Z}_{xy}} + \frac{\underline{Y}_{xy}}{2} \cdot \underline{V}_y \right)^* \quad (\text{Eq. 4.47})$$

- Rendimiento y pérdidas de la red:

$$\eta(\%) = \frac{\sum_{i/P_i < 0} |P_i|}{\sum_{i/P_i > 0} P_i} \cdot 100 \quad (\text{Eq. 4.48})$$

$$\Delta P = \sum_{i=1}^n P_i \quad (\text{Eq. 4.49})$$

4.4. Programación con *Matlab* de la automatización completa de GS y NR

Al disponerme a resolver la primera red (IEEE 3-buses) con ambos métodos (GS y NR) junto con sus dos variantes, observé que, si debía preparar todas y cada una de las ecuaciones a mano para luego introducirlas manualmente a *Matlab*, con la finalidad de que el software me calculara y resolviera el proceso iterativo de cada método hasta converger, esto podría suponer un exceso de carga importante en el caso de redes con un número mayor de buses. Es por ello que me propuse automatizar el procedimiento completo con un código de programación desarrollado con *Matlab*.

La finalidad de automatizar todo el proceso para ambos métodos, era la de intentar crear una herramienta la cual tendría la función de que, aunque se introdujesen la cantidad de buses que fuesen, dicho programa analizaría todos los datos, los procesaría y crearía/formularía él mismo todas las ecuaciones necesarias para resolver el estudio de flujo de cargas fundamental con

cualquiera de los dos métodos matemáticos, es decir, lo mismo que ya se había hecho con la matriz de admitancias de bus automatizada en *Matlab* con el método de las matrices de incidencia.

Finalmente, de un modo satisfactorio, se ha logrado programar y automatizar ambos métodos con ambas variantes de resolución, habiendo como único requisito de funcionamiento el de añadir en un inicio del programa, el código ya realizado de las matrices de admitancias de bus y, además, tener en la misma carpeta del archivo .m, una hoja de cálculo la cual debe tener dispuestos los datos de la manera en la que se muestra en la figura 4.2, junto con el Excel correspondiente con el código de las matriz de admitancias de bus.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1	DATOS BUSES n3 (Con Q límites)									
2										
3	<i>nbus</i>	<i>V</i>	<i>delta</i>	<i>PG</i>	<i>QG</i>	<i>PD</i>	<i>QD</i>	<i>Qmin</i>	<i>Qmax</i>	<i>Tipo</i>
4	1	1,05	0	0	0	0	0	0	0	1
5	2	1	0	0	0	400	250	-40	50	3
6	3	1,04	0	200	0	0	0	0	40	2
7	Base MVA = 100									

Figura 4.2. Ejemplo de entrada de datos en Matlab mediante Excel de la red IEEE 3-buses con límites de Q.

Con todo y eso, el programa lleva a cabo los procedimientos pertinentes y, tras terminar, vuelca los resultados de todas las iteraciones de las cuatro variables principales ($|V|$, δ , P_i , Q_i) en un nuevo archivo Excel junto con la evolución del error a lo largo de las iteraciones realizadas hasta converger, para que de este modo se puedan tratar y utilizar los valores resultado según se prefiera, de un modo más fácil y manejable.

Los programas realizados mediante *Matlab* junto con su código, tanto de GS como NR en sus dos variantes de cálculo, se muestran en el Anexo B. Asimismo, para su modo de empleo se definen una serie de pasos, ya que este programa está diseñado para resolver los tres tipos de redes IEEE n-buses estudiados tanto teniendo en cuenta los límites de generación de Q como sin tenerlos en cuenta. Los pasos a conocer son:

1. Ejecutar el Run del archivo “.m”. Tras ello aparece el título del estudio que se va a realizar junto con el método que se va a emplear, tal como se muestra en la siguiente figura.

Resolución del Problema de Flujo de Cargas Fundamental en Redes IEEE n-buses mediante GAUSS-SEIDEL:

Figura 4.3. Título del programa de la resolución mediante Gauss-Seidel.

Resolución del Problema de Flujo de Cargas Fundamental en Redes IEEE n-buses mediante NEWTON-RAPHSON:

Figura 4.4. Título del programa de la resolución mediante Newton-Raphson.

2. El programa lleva a cabo una primera pregunta, la cual está fundamentada en conocer que red se desea estudiar. Para la red IEEE 3-buses, pulsar “3”, para la red IEEE 14-buses, pulsar “14” y para la red IEEE 30-buses, pulsar “30”. En caso de pulsar cualquier otro valor dará “ERROR” y el programa se finalizará completamente.

`fx` - Que red IEEE n-buses quiere resolver? ¿3, 14 o 30 buses? = |

Figura 4.5. Pregunta 1, red que se quiere estudiar.

3. El programa lleva a cabo una segunda pregunta, dónde el código pretende conocer si se desea tener en cuenta el límite de generación de Q o no. En caso afirmativo se debe pulsar "0" y en caso negativo se debe pulsar "1". En caso de pulsar cualquier otro valor dará "ERROR" y el programa se finalizará completamente.

`fx` - Quiere tener en cuenta los límites de generación de Q? (SI=0 o NO=1) = |

Figura 4.6. Pregunta 2, consideración de los límites de generación de Q.

4. Tras responder correctamente a ambas preguntas, el programa automáticamente calcula de manera interna el problema de flujo de cargas fundamental de la red seleccionada.
5. Tras finalizar, vuelca los resultados en un archivo Excel con el siguiente nombre: Resultados_nXXYY_ZZQlim. Dónde $XX \equiv n^{\circ}$ buses de la red (3, 14 o 30), $YY \equiv$ método empleado (NR o GS) y $ZZ \equiv$ consideración de límite de generación de Q (Sin o Con).
6. Tras abrir el archivo Excel con los resultados correspondientes, éste se encontrará dispuesto con 6 hojas internas: Resultados finales (tabla dispuesta con los valores resultado finales de los cuatro parámetros de estudio principales del flujo de cargas fundamental $[V_i, \delta_i, P_i, Q_i]$), V_{BUS} (evolución de la V de cada bus a lo largo de las iteraciones), delta V_{BUS} (evolución de la δ de cada bus a lo largo de las iteraciones), P_{inj} (potencia activa inyectada en cada bus), Q_{inj} (potencia reactiva inyectada en cada bus) y Errores (evolución del error cometido por cada método numérico a lo largo de las iteraciones en cada bus).

Tras tener claros éstos pasos, ya se puede usar el código para obtener los parámetros característicos de éstas tres redes estudiadas y, al obtener los datos resultado mencionados, se puede llevar a cabo los cálculos posteriores que convengan con tal de estudiar con más profundidad la red en cuestión, ya que todo se encuentra ordenado en una hoja de cálculo de una manera sencilla y cómoda.

4.5. Resultados del estudio del flujo de cargas fundamental en las redes IEEE n-buses

Este apartado tiene la finalidad de presentar los resultados obtenidos de la resolución del problema de flujo de cargas fundamental de las redes IEEE n-buses estudiadas, a partir de los programas automatizados de GS y NR con *Matlab*, sin tener y teniendo en cuenta los límites de generación de Q, de las cuatro variables principales de un SEP ($|V|, \delta, P_i, Q_i$), todo ello expuesto mediante tablas. Por lo tanto, se muestra un subapartado con los datos de los buses introducidos

en *Matlab* junto con los resultados finales, todo ello de cada red. Además, por cada red existirán como mínimo dos tipos de entrada de datos, donde en una se tendrá en cuenta los límites de generación y en la otra no, con la característica que se ha argumentado en el apartado 3. Por último, a modo de análisis de los métodos numéricos utilizados, se mostrará, a continuación de los resultados, una comparación de convergencia entre los dos métodos (NR y GS) a partir de gráficas para cada red, dónde también se extraerán ciertas conclusiones de las mismas.

4.5.1. Resultados red IEEE 3-buses

En este apartado se exponen y analizan los resultados correspondientes al estudio del flujo de cargas fundamental de la red estándar IEEE 3-buses.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1	DATOS BUSES n3 (Con Q límites)									
2										
3	<i>nbus</i>	<i>V</i>	<i>delta</i>	<i>PG</i>	<i>QG</i>	<i>PD</i>	<i>QD</i>	<i>Qmin</i>	<i>Qmax</i>	<i>Tipo</i>
4	1	1,05	0	0	0	0	0	0	0	1
5	2	1	0	0	0	400	250	-40	50	3
6	3	1,04	0	200	0	0	0	0	40	2
7	Base MVA = 100									

Figura 4.7. Datos de entrada de los buses de la red IEEE 3-buses con límites de Q.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1	DATOS BUSES n3 (Sin Q límites)									
2										
3	<i>nbus</i>	<i>V</i>	<i>delta</i>	<i>PG</i>	<i>QG</i>	<i>PD</i>	<i>QD</i>	<i>Qmin</i>	<i>Qmax</i>	<i>Tipo</i>
4	1	1,05	0	0	0	0	0	0	0	1
5	2	1	0	0	0	400	250	-500	500	3
6	3	1,04	0	200	0	0	0	-500	500	2
7	Base MVA = 100									

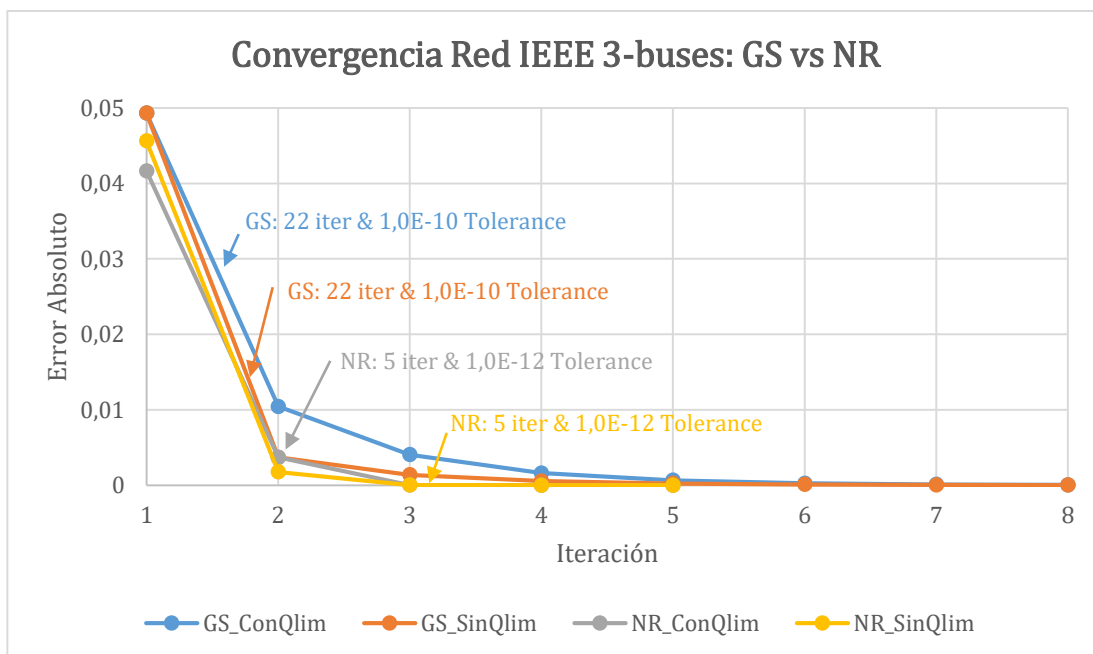
Figura 4.8. Datos de entrada de los buses de la red IEEE 3-buses sin límites de Q.

Tabla 4.3. Resultado del estudio de flujo de cargas fundamental de la red IEEE 3-buses con GS.

Método de GAUSS-SEIDEL								
Bus no.	SIN límites de generación de Q				CON límites de generación de Q			
	$ V $ (p.u)	δ (deg.)	P_i (p.u)	Q_i (p.u)	$ V $ (p.u)	δ (deg.)	P_i (p.u)	Q_i (p.u)
1	1,0500	0,0000	2,1818	1,3320	1,0500	0,0000	2,1983	2,3529
2	0,9726	-2,7157	-4,0000	-2,5000	0,9593	-2,5152	-4,0000	-2,5000
3	1,0400	-0,4968	2,0000	1,3776	1,0202	-0,0699	2,0000	0,4000
	Total de iteraciones = 22				Total de iteraciones = 22			
	Tolerancia = 1,0E-10				Tolerancia = 1,0E-10			
	Rendimiento de la Red = 95,65 %				Rendimiento de la Red = 95,28 %			

Tabla 4.4. Resultado del estudio de flujo de cargas fundamental de la red IEEE 3-buses con NR.

Método de NEWTON-RAPHSON								
Bus no.	SIN límites de generación de Q				CON límites de generación de Q			
	V (p.u)	δ (deg.)	P _i (p.u)	Q _i (p.u)	V (p.u)	δ (deg.)	P _i (p.u)	Q _i (p.u)
1	1,0500	0,0000	2,1818	1,3320	1,0500	0,0000	2,1983	2,3529
2	0,9726	-2,7157	-4,0000	-2,5000	0,9593	-2,5152	-4,0000	-2,5000
3	1,0400	-0,4968	2,0000	1,3776	1,0202	-0,0699	2,0000	0,4000
Total de iteraciones = 5				Total de iteraciones = 5				
Tolerancia = 1,0E-12				Tolerancia = 1,0E-12				
Rendimiento de la Red = 95,65 %				Rendimiento de la Red = 95,28 %				



Gráfica 4.1. Comparación de convergencia del error de GS vs NR en la red IEEE 3-buses.

Analizando los resultados del flujo de cargas fundamental de la red IEEE 3-buses se observa, tanto en el caso con límites de Q como sin ellos, que los valores de la tensión de bus cumplen con la normativa vigente, ya que todos los valores se encuentran en el rango de 0,9 a 1,118 pu que estipula la norma, presente en la tabla 4 del punto 8.2.6 del BOE-A-2018-2198 [12][13], es por ello, que no se proponen medidas correctoras en ninguno de los buses con tal de corregir los parámetros calculados. Asimismo, comparando los resultados de los dos casos estudiados, se puede ver como el sistema ha hallado y, posteriormente, corregido, el límite de Q del bus 3, ya que éste superaba su límite máximo de 0,4 pu, entonces, ha fijado dicho valor a su $Q_{3,máx}$ y reestructurado los valores de tensión de los buses 2 y 3 a modo de compensación.

Por otro lado, si se comparan los resultados obtenidos con Gauss-Seidel con los de Newton-Raphson, se puede comprobar que todos ellos son iguales. Esto de un comienzo, conlleva a una primera posible afirmación de la no existencia de errores en los resultados, además, en segundo lugar, si se aprecian los valores que se han obtenido en las tablas IV y V de [6] del estudio del flujo de cargas fundamental de esta misma red (cuyos datos de entrada son idénticos), se observa que el autor obtiene los mismos resultados, así pues, eso fundamenta todavía más el correcto desarrollo y cálculo del estudio del flujo de cargas fundamental en esta red IEEE 3-buses. En definitiva, los resultados obtenidos son correctos.

En adición a la comparativa que se está realizando de ambos métodos de cálculo empleados, se ha llevado a cabo una gráfica (gráfica 4.1) de la convergencia de éstos, con la finalidad de observar las diferencias principales mencionadas en el apartado 4.2.3. Analizando dicha gráfica, tal como se esperaba, se demuestra como NR presenta un menor número de iteraciones que GS a la hora de converger hacia el resultado final. En este caso NR necesita 5 iteraciones para sus dos variantes y GS necesita 22 también para ambas entradas.

4.5.2. Resultados red IEEE 14-buses

a. Red ESTÁNDAR IEEE 14-buses

En este apartado, en primer lugar, se exponen y analizan los resultados correspondientes al estudio del flujo de cargas fundamental de la red estándar IEEE 14-buses.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1	DATOS BUSES n14 (Con Q límites)									
2										
3	<i>nbus</i>	<i>V</i>	<i>delta</i>	<i>PG</i>	<i>QG</i>	<i>PD</i>	<i>QD</i>	<i>Qmin</i>	<i>Qmax</i>	<i>Tipo</i>
4	1	1,06	0	0	0	0	0	0	0	1
5	2	1,045	0	18,3	5,857	0	0	-500	500	2
6	3	1	0	0	0	119	8,762	0	0	3
7	4	1	0	0	0	47,79	3,9	0	500	3
8	5	1	0	0	0	7,599	1,599	0	0	3
9	6	1,07	0	11,2	44,2	0	0	-30	30	2
10	7	1	0	0	0	0	0	0	0	3
11	8	1	0	0	0	0	12,9	0	0	3
12	9	1	0	0	0	29,499	16,599	0	0	3
13	10	1	0	0	0	9	5,799	0	0	3
14	11	1	0	0	0	3,501	1,8	0	500	3
15	12	1	0	0	0	6,099	1,599	0	0	3
16	13	1	0	0	0	13,5	5,799	0	0	3
17	14	1	0	0	0	14,901	5,001	0	0	3
18	Base MVA = 100									

Figura 4.9. Datos de entrada de los buses de la red ESTÁNDAR IEEE 14-buses con límites de Q.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1	DATOS BUSES n14 (Sin Q límites)									
2										
3	<i>nbus</i>	<i>V</i>	<i>delta</i>	<i>PG</i>	<i>QG</i>	<i>PD</i>	<i>QD</i>	<i>Qmin</i>	<i>Qmax</i>	<i>Tipo</i>
4	1	1,06	0	0	0	0	0	0	0	1
5	2	1,045	0	18,3	5,857	0	0	-500	500	2
6	3	1	0	0	0	119	8,762	0	0	3
7	4	1	0	0	0	47,79	3,9	0	500	3
8	5	1	0	0	0	7,599	1,599	0	0	3
9	6	1,07	0	11,2	44,2	0	0	-500	500	2
10	7	1	0	0	0	0	0	0	0	3
11	8	1	0	0	0	0	12,9	0	0	3
12	9	1	0	0	0	29,499	16,599	0	0	3
13	10	1	0	0	0	9	5,799	0	0	3
14	11	1	0	0	0	3,501	1,8	0	500	3
15	12	1	0	0	0	6,099	1,599	0	0	3
16	13	1	0	0	0	13,5	5,799	0	0	3
17	14	1	0	0	0	14,901	5,001	0	0	3
18	Base MVA = 100									

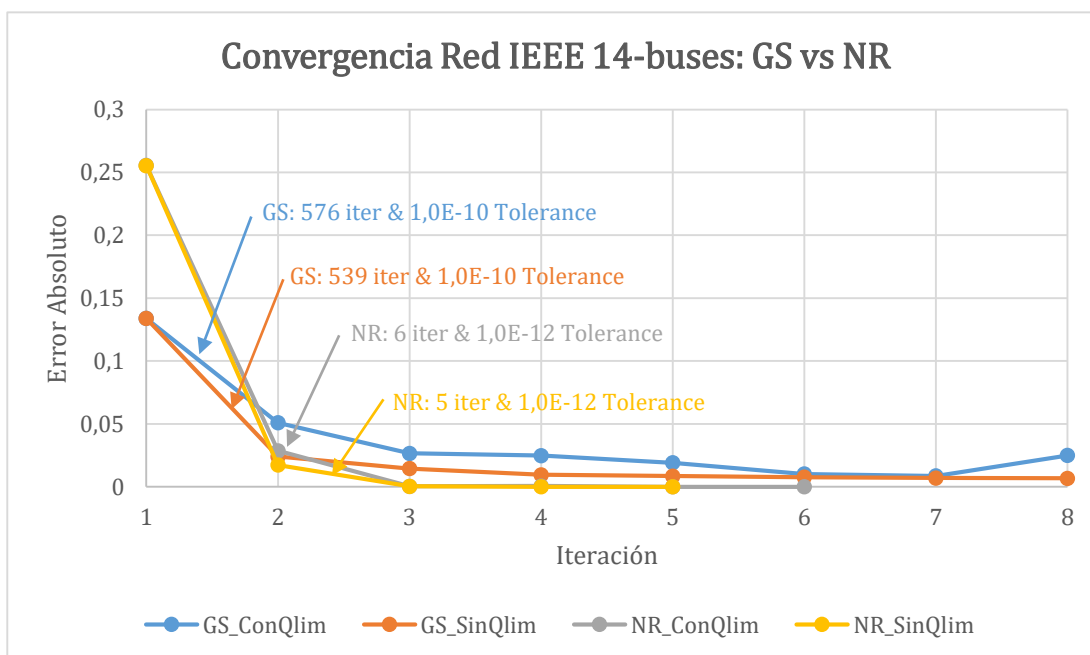
Figura 4.10. Datos de entrada de los buses de la red ESTÁNDAR IEEE 14-buses sin límites de Q.

Tabla 4.5. Resultado del estudio de flujo de cargas fundamental de la red ESTÁNDAR IEEE 14-buses con GS.

Método de GAUSS-SEIDEL								
Bus no.	SIN límites de generación de Q				CON límites de generación de Q			
	V (p.u)	δ (deg.)	P _i (p.u)	Q _i (p.u)	V (p.u)	δ (deg.)	P _i (p.u)	Q _i (p.u)
1	1,0600	0,0000	2,3721	-0,2527	1,0600	0,0000	2,3714	-0,2263
2	1,0450	-5,1800	0,1830	0,0214	1,0450	-5,1914	0,1830	0,1071
3	1,0421	-14,5093	-1,1900	-0,0876	1,0387	-14,5297	-1,1900	-0,0876
4	1,0277	-10,3453	-0,4779	-0,0390	1,0219	-10,2988	-0,4779	-0,0390
5	1,0355	-8,7190	-0,0760	-0,0160	1,0297	-8,6417	-0,0760	-0,0160
6	1,0700	-12,5310	0,1120	0,4055	1,0482	-12,4396	0,1120	0,3000
7	1,0169	-13,4083	0,0000	0,0000	1,0052	-13,4784	0,0000	0,0000
8	1,0184	-13,4315	0,0000	-0,1290	1,0061	-13,5016	0,0000	-0,1290
9	1,0163	-13,5698	-0,2950	-0,1660	1,0043	-13,6471	-0,2950	-0,1660
10	1,0180	-13,6639	-0,0900	-0,0580	1,0042	-13,7258	-0,0900	-0,0580
11	1,0398	-13,2076	-0,0350	-0,0180	1,0221	-13,2042	-0,0350	-0,0180
12	1,0523	-13,4362	-0,0610	-0,0160	1,0310	-13,3839	-0,0610	-0,0160
13	1,0444	-13,5049	-0,1350	-0,0580	1,0237	-13,4743	-0,1350	-0,0580
14	1,0101	-14,5836	-0,1490	-0,0500	0,9940	-14,6493	-0,1490	-0,0500
	Total de iteraciones = 539				Total de iteraciones = 576			
	Tolerancia = 1,0E-10				Tolerancia = 1,0E-10			
	Rendimiento de la Red = 94,07 %				Rendimiento de la Red = 94,09 %			

Tabla 4.6. Resultado del estudio de flujo de cargas fundamental de la red ESTÁNDAR IEEE 14-buses con NR.

Método de NEWTON-RAPHSON								
Bus no.	SIN límites de generación de Q				CON límites de generación de Q			
	V (p.u)	δ (deg.)	P _i (p.u)	Q _i (p.u)	V (p.u)	δ (deg.)	P _i (p.u)	Q _i (p.u)
1	1,0600	0,0000	2,3721	-0,2527	1,0600	0,0000	2,3714	-0,2263
2	1,0450	-5,1800	0,1830	0,0214	1,0450	-5,1914	0,1830	0,1071
3	1,0421	-14,5093	-1,1900	-0,0876	1,0387	-14,5297	-1,1900	-0,0876
4	1,0277	-10,3453	-0,4779	-0,0390	1,0219	-10,2988	-0,4779	-0,0390
5	1,0355	-8,7190	-0,0760	-0,0160	1,0297	-8,6417	-0,0760	-0,0160
6	1,0700	-12,5310	0,1120	0,4055	1,0482	-12,4396	0,1120	0,3000
7	1,0169	-13,4083	0,0000	0,0000	1,0052	-13,4784	0,0000	0,0000
8	1,0184	-13,4315	0,0000	-0,1290	1,0061	-13,5016	0,0000	-0,1290
9	1,0163	-13,5698	-0,2950	-0,1660	1,0043	-13,6471	-0,2950	-0,1660
10	1,0180	-13,6639	-0,0900	-0,0580	1,0042	-13,7258	-0,0900	-0,0580
11	1,0398	-13,2076	-0,0350	-0,0180	1,0221	-13,2042	-0,0350	-0,0180
12	1,0523	-13,4362	-0,0610	-0,0160	1,0310	-13,3839	-0,0610	-0,0160
13	1,0444	-13,5049	-0,1350	-0,0580	1,0237	-13,4743	-0,1350	-0,0580
14	1,0101	-14,5836	-0,1490	-0,0500	0,9940	-14,6493	-0,1490	-0,0500
	Total de iteraciones = 5				Total de iteraciones = 6			
	Tolerancia = 1,0E-12				Tolerancia = 1,0E-12			
	Rendimiento de la Red = 94,07 %				Rendimiento de la Red = 94,09 %			



Gráfica 4.2. Comparación de convergencia del error de GS vs NR en la red ESTÁNDAR IEEE 14-buses.

Tras analizar detenidamente los resultados del flujo de cargas fundamental de la red estándar IEEE 14-buses se observa, en ambos casos de estudio, que los valores de la tensión de bus cumplen con la normativa vigente, ya que estos se encuentran en el rango de 0,9 a 1,118 pu que estipula la norma (tabla 4 del punto 8.2.6 del BOE-A-2018-2198 [12][13]), por lo tanto, para esta red en sus dos variantes, no se proponen medidas correctoras, como podrían ser bancos de condensadores. Posteriormente, comparando los resultados de los dos casos estudiados, se puede ver como el sistema ha corregido el límite de generación de reactiva del bus 6, ya que éste en un inicio superaba el límite máximo estipulado en 0,3 pu. Es por ello que el código de resolución que se ha programado, ha fijado dicho valor de Q_6 al de $Q_{6,máx}$ y reestructurado los valores de módulo y/o argumento de la tensión del resto de buses con finalidades compensatorias.

En segundo lugar, comparando los resultados obtenidos a partir de los dos métodos numéricos empleados (GS y NR), se puede verificar que todos los valores son idénticos. Esto en un primer instante propicia a aceptar los valores como buenos, pero para afirmar con certeza sobre la validez de dichos resultados, se comparan con los valores obtenidos en la tabla 2.8 y 2.17 de [4] y, entonces, se llega a la conclusión que los valores que se han obtenido son totalmente correctos. Cabe decir que en comparación con los valores que obtuvieron en [4] se aprecian ciertas diferencias y mínimas variaciones en los valores resultado, esto viene dado por el hecho que los valores de entrada de ese estudio respecto a los de este proyecto varían levemente por cuestiones mencionadas en el apartado 3.1.2.

Adicionalmente a la comparativa de Gauss-Seidel con Newton-Raphson, se ha realizado la gráfica 4.2, la cual presenta una comparación de convergencia de ambos métodos en esta red de 14 buses, donde esta parte con la finalidad de observar las diferencias principales mencionadas en el apartado 4.2.3, del mismo modo que se ha hecho con la red IEEE 3-buses. Tras su correspondiente análisis, se vuelve a demostrar que NR presenta una mejor convergencia que GS a la hora de converger hacia el resultado final, ya que apenas le ha influido en las iteraciones necesarias para converger el haber aumentado el número de buses de 3 a 14, todo lo contrario que a GS. En este caso NR necesita 5 y 6 iteraciones para los casos de sin y con límites de Q, correspondientemente, y GS necesita 539 y 576 iteraciones para sus dos respectivas variantes, todo tal como se indica en la gráfica 4.2.

b. Red ORIGINAL IEEE 14-buses

Tras exponer y analizar los resultados de la red estándar IEEE 14-buses, se procede a mostrar los resultados correspondientes al estudio del flujo de cargas fundamental de la red original IEEE 14-buses. Todo ello, con la finalidad de únicamente presentar los resultados del estudio pertinente, donde, tal como se ha dicho, los valores de entrada presentan un cambio diferencial, respecto al modelo estándar de la red, al poseer un factor de regulación en los transformadores distinto de 1 ($a \neq 1$). Entonces, es por ello que se quiere demostrar el conocimiento y correcto desarrollo de

resolución en el programa implementado en *Matlab* con dicha variante en el sistema, enseñando y tabulando los resultados obtenidos de la resolución del flujo de cargas fundamental para este caso.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1	DATOS BUSES n14 (Con Q límites)									
2										
3	<i>nbus</i>	<i>V</i>	<i>delta</i>	<i>PG</i>	<i>QG</i>	<i>PD</i>	<i>QD</i>	<i>Qmin</i>	<i>Qmax</i>	<i>Tipo</i>
4	1	1,060	0	232,4	-16,9	0	0	0	0	1
5	2	1,045	0	40	42,4	21,7	12,7	-40	50	2
6	3	1,010	0	0	23,4	94,2	19	0	40	2
7	4	1	0	0	0	47,8	-3,9	0	0	3
8	5	1	0	0	0	7,6	1,6	0	0	3
9	6	1,07	0	0	12,2	11,2	7,5	-6	24	2
10	7	1	0	0	0	0	0	0	0	3
11	8	1,09	0	0	17,4	0	0	-6	24	2
12	9	1	0	0	0	29,5	16,6	0	0	3
13	10	1	0	0	0	9	5,8	0	0	3
14	11	1	0	0	0	3,5	1,8	0	0	3
15	12	1	0	0	0	6,1	1,6	0	0	3
16	13	1	0	0	0	13,5	5,8	0	0	3
17	14	1	0	0	0	14,9	5	0	0	3

Figura 4.11. Datos de entrada de los buses de la red ORIGINAL IEEE 14-buses con límites de *Q*.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1	DATOS BUSES n14 (Sin Q límites)									
2										
3	<i>nbus</i>	<i>V</i>	<i>delta</i>	<i>PG</i>	<i>QG</i>	<i>PD</i>	<i>QD</i>	<i>Qmin</i>	<i>Qmax</i>	<i>Tipo</i>
4	1	1,060	0	232,4	-16,9	0	0	0	0	1
5	2	1,045	0	40	42,4	21,7	12,7	-500	500	2
6	3	1,010	0	0	23,4	94,2	19	-500	500	2
7	4	1	0	0	0	47,8	-3,9	0	0	3
8	5	1	0	0	0	7,6	1,6	0	0	3
9	6	1,07	0	0	12,2	11,2	7,5	-500	500	2
10	7	1	0	0	0	0	0	0	0	3
11	8	1,09	0	0	17,4	0	0	-500	500	2
12	9	1	0	0	0	29,5	16,6	0	0	3
13	10	1	0	0	0	9	5,8	0	0	3
14	11	1	0	0	0	3,5	1,8	0	0	3
15	12	1	0	0	0	6,1	1,6	0	0	3
16	13	1	0	0	0	13,5	5,8	0	0	3
17	14	1	0	0	0	14,9	5	0	0	3

Figura 4.12. Datos de entrada de los buses de la red ORIGINAL IEEE 14-buses sin límites de *Q*.

Tabla 4.7. Resultado del estudio de flujo de cargas fundamental de la red ORIGINAL IEEE 14-buses con GS.

Método de GAUSS-SEIDEL								
Bus no.	SIN límites de generación de Q				CON límites de generación de Q			
	V (p.u)	δ (deg.)	P _i (p.u)	Q _i (p.u)	V (p.u)	δ (deg.)	P _i (p.u)	Q _i (p.u)
1	1,0600	0,0000	2,3270	-0,3081	1,0600	0,0000	2,3169	-0,2246
2	1,0450	-4,9228	0,1830	-0,0352	1,0450	-4,9419	0,1836	0,1651
3	1,0100	-12,4963	-0,9420	-0,0978	1,0102	-12,6215	-0,9418	0,0000
4	1,0429	-10,5393	-0,4780	0,0390	1,0269	-10,3725	-0,4767	0,0395
5	1,0515	-9,1719	-0,0760	-0,0160	1,0334	-8,8966	-0,0757	-0,0158
6	1,0700	-14,5473	-0,1120	0,6394	0,9965	-14,3995	-0,1107	0,2401
7	1,0501	-13,4834	0,0000	0,0000	1,0183	-13,6224	0,0010	0,0006
8	1,0900	-13,4834	0,0000	0,2468	1,0583	-13,6222	0,0000	0,2400
9	1,0429	-15,0666	-0,2950	-0,1660	1,0024	-15,4193	-0,2938	-0,1658
10	1,0402	-15,2582	-0,0900	-0,0580	0,9935	-15,5717	-0,0896	-0,0579
11	1,0514	-15,0262	-0,0350	-0,0180	0,9914	-15,1514	-0,0350	-0,0180
12	1,0542	-15,3981	-0,0610	-0,0160	0,9821	-15,3801	-0,0607	-0,0161
13	1,0485	-15,4532	-0,1350	-0,0580	0,9785	-15,5086	-0,1348	-0,0580
14	1,0272	-16,2494	-0,1490	-0,0500	0,9728	-16,5933	-0,1490	-0,0500
	Total de iteraciones = 264				Total de iteraciones = 101			
	Tolerancia = 1,0E-10				Tolerancia = 1,0E-4			
	Rendimiento de la Red = 94,54 %				Rendimiento de la Red = 94,66 %			

Tabla 4.8. Resultado del estudio de flujo de cargas fundamental de la red ORIGINAL IEEE 14-buses con NR.

Método de NEWTON-RAPHSON								
Bus no.	SIN límites de generación de Q				CON límites de generación de Q			
	V (p.u)	δ (deg.)	P _i (p.u)	Q _i (p.u)	V (p.u)	δ (deg.)	P _i (p.u)	Q _i (p.u)
1	1,0600	0,0000	2,3270	-0,3081	1,0600	0,0000	2,3245	-0,2421
2	1,0450	-4,9228	0,1830	-0,0352	1,0450	-4,9590	0,1830	0,0335
3	1,0100	-12,4963	-0,9420	-0,0978	1,0266	-12,8091	-0,9420	0,1505
4	1,0429	-10,5393	-0,4780	0,0390	1,0318	-10,4345	-0,4780	0,0390
5	1,0515	-9,1719	-0,0760	-0,0160	1,0369	-8,9475	-0,0760	-0,0160
6	1,0700	-14,5473	-0,1120	0,6394	1,0001	-14,4340	-0,1120	0,2400
7	1,0501	-13,4834	0,0000	0,0000	1,0228	-13,6772	0,0000	0,0000
8	1,0900	-13,4834	0,0000	0,2468	1,0626	-13,6772	0,0000	0,2400
9	1,0429	-15,0666	-0,2950	-0,1660	1,0069	-15,4640	-0,2950	-0,1660
10	1,0402	-15,2582	-0,0900	-0,0580	0,9979	-15,6138	-0,0900	-0,0580

11	1,0514	-15,0262	-0,0350	-0,0180	0,9954	-15,1892	-0,0350	-0,0180
12	1,0542	-15,3981	-0,0610	-0,0160	0,9859	-15,4113	-0,0610	-0,0160
13	1,0485	-15,4532	-0,1350	-0,0580	0,9823	-15,5393	-0,1350	-0,0580
14	1,0272	-16,2494	-0,1490	-0,0500	0,9771	-16,6224	-0,1490	-0,0500
	Total de iteraciones = 5				Total de iteraciones = 7			
	Tolerancia = 1,0E-12				Tolerancia = 1,0E-12			
	Rendimiento de la Red = 94,54 %				Rendimiento de la Red = 94,64 %			

4.5.3. Resultados red IEEE 30-buses

a. Red ESTÁNDAR IEEE 30-buses

En este apartado, se exponen y analizan los resultados correspondientes al estudio del flujo de cargas fundamental de la red estándar IEEE 30-buses.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1	DATOS BUSES n30 (Con Q límites)									
2										
3	<i>nbus</i>	<i>V</i>	<i>delta</i>	<i>PG</i>	<i>QG</i>	<i>PD</i>	<i>QD</i>	<i>Qmin</i>	<i>Qmax</i>	<i>Tipo</i>
4	1	1,05	0	0	0	0	0	0	0	1
5	2	1,0338	0	57,56	2,47	21,7	12,7	-500	500	2
6	3	1	0	0	0	2,4	1,2	0	0	3
7	4	1	0	0	0	7,6	1,6	0	0	3
8	5	1,0058	0	24,56	22,57	94,2	19	-500	500	2
9	6	1	0	0	0	0	0	0	0	3
10	7	1	0	0	0	62,8	10,9	0	0	3
11	8	1,023	0	35	34,84	80	30	-500	500	2
12	9	1	0	0	0	0	0	0	0	3
13	10	1	0	0	0	5,8	2	0	0	3
14	11	1,0913	0	17,93	30,78	0	0	-20	20	2
15	12	1	0	0	0	11,2	7,5	0	0	3
16	13	1,0883	0	16,91	37,83	0	0	-30	30	2
17	14	1	0	0	0	6,2	1,6	0	0	3
18	15	1	0	0	0	8,2	2,5	0	0	3
19	16	1	0	0	0	3,5	1,8	0	0	3
20	17	1	0	0	0	9	5,8	0	0	3
21	18	1	0	0	0	3,2	0,9	0	0	3
22	19	1	0	0	0	9,5	3,4	0	0	3
23	20	1	0	0	0	2,2	0,7	0	0	3
24	21	1	0	0	0	17,5	11,2	0	0	3
25	22	1	0	0	0	0	0	0	0	3
26	23	1	0	0	0	3,2	1,6	0	0	3

27	24	1	0	0	0	8,7	6,7	0	0	3
28	25	1	0	0	0	0	0	0	0	3
29	26	1	0	0	0	3,5	2,3	0	0	3
30	27	1	0	0	0	0	0	0	0	3
31	28	1	0	0	0	0	0	0	0	3
32	29	1	0	0	0	2,4	0,9	0	0	3
33	30	1	0	0	0	10,6	1,9	0	0	3
34	Base MVA = 100									

Figura 4.13. Datos de entrada de los buses de la red ESTÁNDAR IEEE 30-buses con límites de Q.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1	DATOS BUSES n30 (Sin Q límites)									
2										
3	<i>nbus</i>	<i>V</i>	<i>delta</i>	<i>PG</i>	<i>QG</i>	<i>PD</i>	<i>QD</i>	<i>Qmin</i>	<i>Qmax</i>	<i>Tipo</i>
4	1	1,05	0	0	0	0	0	0	0	1
5	2	1,0338	0	57,56	2,47	21,7	12,7	-500	500	2
6	3	1	0	0	0	2,4	1,2	0	0	3
7	4	1	0	0	0	7,6	1,6	0	0	3
8	5	1,0058	0	24,56	22,57	94,2	19	-500	500	2
9	6	1	0	0	0	0	0	0	0	3
10	7	1	0	0	0	62,8	10,9	0	0	3
11	8	1,023	0	35	34,84	80	30	-500	500	2
12	9	1	0	0	0	0	0	0	0	3
13	10	1	0	0	0	5,8	2	0	0	3
14	11	1,0913	0	17,93	30,78	0	0	-500	500	2
15	12	1	0	0	0	11,2	7,5	0	0	3
16	13	1,0883	0	16,91	37,83	0	0	-500	500	2
17	14	1	0	0	0	6,2	1,6	0	0	3
18	15	1	0	0	0	8,2	2,5	0	0	3
19	16	1	0	0	0	3,5	1,8	0	0	3
20	17	1	0	0	0	9	5,8	0	0	3
21	18	1	0	0	0	3,2	0,9	0	0	3
22	19	1	0	0	0	9,5	3,4	0	0	3
23	20	1	0	0	0	2,2	0,7	0	0	3
24	21	1	0	0	0	17,5	11,2	0	0	3
25	22	1	0	0	0	0	0	0	0	3
26	23	1	0	0	0	3,2	1,6	0	0	3
27	24	1	0	0	0	8,7	6,7	0	0	3
28	25	1	0	0	0	0	0	0	0	3
29	26	1	0	0	0	3,5	2,3	0	0	3
30	27	1	0	0	0	0	0	0	0	3
31	28	1	0	0	0	0	0	0	0	3
32	29	1	0	0	0	2,4	0,9	0	0	3
33	30	1	0	0	0	10,6	1,9	0	0	3
34	Base MVA = 100									

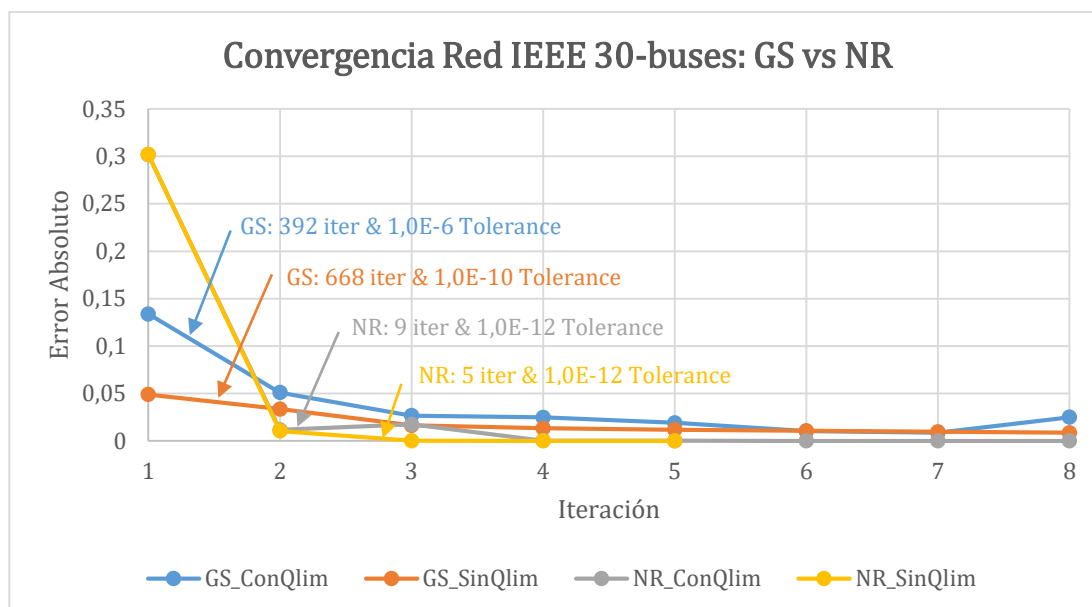
Figura 4.14. Datos de entrada de los buses de la red ESTÁNDAR IEEE 30-buses sin límites de Q.

Tabla 4.9. Resultado del estudio de flujo de cargas fundamental de la red ESTÁNDAR IEEE 30-buses con GS.

Método de GAUSS-SEIDEL								
Bus no.	SIN límites de generación de Q				CON límites de generación de Q			
	V (p.u)	δ (deg.)	P _i (p.u)	Q _i (p.u)	V (p.u)	δ (deg.)	P _i (p.u)	Q _i (p.u)
1	1,0500	0,0000	2,3861	-0,3072	1,0500	0,0000	2,3859	-0,3021
2	1,0338	-4,8388	0,3586	-0,0641	1,0338	-4,8403	0,3586	-0,0525
3	1,0308	-7,5306	-0,0240	-0,0120	1,0299	-7,5188	-0,0240	-0,0120
4	1,0255	-9,2411	-0,0760	-0,0160	1,0245	-9,2274	-0,0760	-0,0160
5	1,0058	-13,3877	-0,6964	0,0506	1,0058	-13,3953	-0,6964	0,0555
6	1,0217	-11,2117	0,0000	0,0000	1,0208	-11,2018	0,0000	0,0000
7	1,0011	-13,7397	-0,6280	-0,1090	1,0005	-13,7384	-0,6280	-0,1090
8	1,0230	-12,2781	-0,4500	0,1238	1,0230	-12,2856	-0,4500	0,1519
9	1,0461	-12,7418	0,0000	0,0000	1,0401	-12,7307	0,0000	0,0000
10	1,0362	-14,5824	-0,0580	-0,0200	1,0312	-14,5849	-0,0580	-0,0200
11	1,0913	-10,8698	0,1793	0,2399	1,0781	-10,8247	0,1793	0,2000
12	1,0484	-13,4284	-0,1120	-0,0750	1,0441	-13,4348	-0,1120	-0,0750
13	1,0883	-12,2394	0,1691	0,3121	1,0827	-12,2348	0,1691	0,3000
14	1,0333	-14,3980	-0,0620	-0,0160	1,0289	-14,4116	-0,0620	-0,0160
15	1,0281	-14,5512	-0,0820	-0,0250	1,0237	-14,5643	-0,0820	-0,0250
16	1,0352	-14,1856	-0,0350	-0,0180	1,0306	-14,1912	-0,0350	-0,0180
17	1,0309	-14,6780	-0,0900	-0,0580	1,0261	-14,6839	-0,0900	-0,0580
18	1,0187	-15,2694	-0,0320	-0,0090	1,0140	-15,2851	-0,0320	-0,0090
19	1,0163	-15,5017	-0,0950	-0,0340	1,0115	-15,5173	-0,0950	-0,0340
20	1,0205	-15,3306	-0,0220	-0,0070	1,0156	-15,3434	-0,0220	-0,0070
21	1,0232	-15,0557	-0,1750	-0,1120	1,0183	-15,0632	-0,1750	-0,1120
22	1,0235	-15,0483	0,0000	0,0000	1,0187	-15,0559	0,0000	0,0000
23	1,0164	-15,1083	-0,0320	-0,0160	1,0120	-15,1250	-0,0320	-0,0160
24	1,0094	-15,5048	-0,0870	-0,0670	1,0051	-15,5232	-0,0870	-0,0670
25	1,0005	-15,5399	0,0000	0,0000	0,9974	-15,5696	0,0000	0,0000
26	0,9825	-15,9740	-0,0350	-0,0230	0,9794	-16,0065	-0,0350	-0,0230
27	1,0038	-15,2991	0,0000	0,0000	1,0015	-15,3328	0,0000	0,0000
28	1,0205	-11,8564	0,0000	0,0000	1,0196	-11,8515	0,0000	0,0000
29	0,9835	-16,5783	-0,0240	-0,0090	0,9812	-16,6179	-0,0240	-0,0090
30	0,9718	-17,4976	-0,1060	-0,0190	0,9695	-17,5416	-0,1060	-0,0190
	Total de iteraciones = 668				Total de iteraciones = 392			
	Tolerancia = 1,0E-10				Tolerancia = 1,0E-06			
	Rendimiento de la Red = 94,45 %				Rendimiento de la Red = 94,45 %			

Tabla 4.10. Resultado del estudio de flujo de cargas fundamental de la red ESTÁNDAR IEEE 30-buses con NR.

Método de NEWTON-RAPHSON								
Bus no.	SIN límites de generación de Q				CON límites de generación de Q			
	V (p.u)	δ (deg.)	P _i (p.u)	Q _i (p.u)	V (p.u)	δ (deg.)	P _i (p.u)	Q _i (p.u)
1	1,0500	0,0000	2,3861	-0,3072	1,0500	0,0000	2,3861	-0,3021
2	1,0338	-4,8388	0,3586	-0,0641	1,0338	-4,8406	0,3586	-0,0524
3	1,0308	-7,5306	-0,0240	-0,0120	1,0299	-7,5194	-0,0240	-0,0120
4	1,0255	-9,2411	-0,0760	-0,0160	1,0245	-9,2281	-0,0760	-0,0160
5	1,0058	-13,3877	-0,6964	0,0506	1,0058	-13,3959	-0,6964	0,0556
6	1,0217	-11,2117	0,0000	0,0000	1,0208	-11,2026	0,0000	0,0000
7	1,0011	-13,7397	-0,6280	-0,1090	1,0005	-13,7392	-0,6280	-0,1090
8	1,0230	-12,2781	-0,4500	0,1238	1,0230	-12,2865	-0,4500	0,1520
9	1,0461	-12,7418	0,0000	0,0000	1,0401	-12,7320	0,0000	0,0000
10	1,0362	-14,5824	-0,0580	-0,0200	1,0312	-14,5864	-0,0580	-0,0200
11	1,0913	-10,8698	0,1793	0,2399	1,0781	-10,8259	0,1793	0,2000
12	1,0484	-13,4284	-0,1120	-0,0750	1,0441	-13,4362	-0,1120	-0,0750
13	1,0883	-12,2394	0,1691	0,3121	1,0827	-12,2362	0,1691	0,3000
14	1,0333	-14,3980	-0,0620	-0,0160	1,0289	-14,4131	-0,0620	-0,0160
15	1,0281	-14,5512	-0,0820	-0,0250	1,0237	-14,5658	-0,0820	-0,0250
16	1,0352	-14,1856	-0,0350	-0,0180	1,0306	-14,1926	-0,0350	-0,0180
17	1,0309	-14,6780	-0,0900	-0,0580	1,0260	-14,6854	-0,0900	-0,0580
18	1,0187	-15,2694	-0,0320	-0,0090	1,0140	-15,2867	-0,0320	-0,0090
19	1,0163	-15,5017	-0,0950	-0,0340	1,0115	-15,5189	-0,0950	-0,0340
20	1,0205	-15,3306	-0,0220	-0,0070	1,0156	-15,3450	-0,0220	-0,0070
21	1,0232	-15,0557	-0,1750	-0,1120	1,0183	-15,0648	-0,1750	-0,1120
22	1,0235	-15,0483	0,0000	0,0000	1,0187	-15,0575	0,0000	0,0000
23	1,0164	-15,1083	-0,0320	-0,0160	1,0120	-15,1266	-0,0320	-0,0160
24	1,0094	-15,5048	-0,0870	-0,0670	1,0051	-15,5247	-0,0870	-0,0670
25	1,0005	-15,5399	0,0000	0,0000	0,9974	-15,5711	0,0000	0,0000
26	0,9825	-15,9740	-0,0350	-0,0230	0,9794	-16,0080	-0,0350	-0,0230
27	1,0038	-15,2991	0,0000	0,0000	1,0015	-15,3342	0,0000	0,0000
28	1,0205	-11,8564	0,0000	0,0000	1,0196	-11,8524	0,0000	0,0000
29	0,9835	-16,5783	-0,0240	-0,0090	0,9812	-16,6192	-0,0240	-0,0090
30	0,9718	-17,4976	-0,1060	-0,0190	0,9694	-17,5430	-0,1060	-0,0190
	Total de iteraciones = 5				Total de iteraciones = 9			
	Tolerancia = 1,0E-12				Tolerancia = 1,0E-12			
	Rendimiento de la Red = 94,45 %				Rendimiento de la Red = 94,45 %			



Gráfica 4.3. Comparación de convergencia del error de GS vs NR en la red IEEE 30-buses.

Del mismo modo que en las dos redes analizadas anteriormente, todos y cada uno de sus valores de tensión permanecen en el rango legislativo de 0,9 a 1,1 pu, por lo tanto, tampoco se aplicará ningún tipo de medida correctora, como, por ejemplo, compensadores síncronos. Seguidamente, analizando los resultados de los dos casos estudiados, se puede observar como el sistema, al incorporarle al procedimiento de cálculo los rangos de límites de Q, ha corregido el nivel de tensión de los buses 11 y 13, tras tener que fijar los valores de reactiva a sus máximos correspondientes de 20 y 30 Mvar, respectivamente.

Para continuar, cabe decir que para esta red los resultados obtenidos para GS y para NR, en el caso de con límites de Q, los valores no son exactamente iguales, esto viene dado por el hecho de que en Gauss-Seidel se ha tenido que rebajar la tolerancia de error ya que presentaba problemas de convergencia con la que había de un inicio, entonces, al ser esta menor, el programa no lleva a cabo todas las iteraciones requeridas para que los resultados al lado de Newton-Raphson sean idénticos. Esto no implica que los resultados sean erróneos, ya que, aunque no sean iguales, prácticamente se pueden considerar como tal, por lo tanto, de un principio se pueden tomar como correctos. Así pues, con tal de garantizar que los valores son estrictamente correctos, se lleva a cabo una comparación con los resultados que obtuvo en la tabla 2.9 y 2.18 el autor de [4] y, al igual que en el resto de casos, se llega a la conclusión que los valores que se han obtenido son totalmente correctos. Asimismo, se enfatiza que en comparación con los valores que obtuvieron en la fuente referenciada, se aprecian ciertas diferencias y mínimas variaciones en los valores resultado, viniendo dado por el hecho que los valores de entrada de ese estudio respecto a los de este proyecto varían levemente por cuestiones mencionadas en el apartado 3.1.2.

Para concluir con la comparativa GS vs NR, se ha representado la gráfica 4.3, tal como se ha hecho para el resto de redes. Esta presenta de un modo gráfico una comparación de la convergencia de los dos métodos matemáticos, en este caso para la red estándar de 30 buses. En esta red se vuelve a observar las buenas prestaciones que tiene NR, ya que no requiere de apenas más iteraciones en comparación con las redes de menor tamaño. Esto no es lo que ocurre con GS, la cual presenta una convergencia mucho peor al haber aumentado considerablemente el número de buses, habiendo incluso que reducir la tolerancia de error en el cálculo del sistema ya que en uno de sus casos con la tolerancia inicial de 1E-10 no convergía de ningún modo, reduciéndola entonces a 1E-06 para que los cálculos pudiesen completarse. Concluyendo, este caso NR necesita 5 y 9 iteraciones para los casos de sin y con límites de Q, respectivamente, y GS necesita 668 para el caso de sin límites de Q y 392 iteraciones (reduciéndose la tolerancia) en el caso de con límites de Q. Todo ello se indica en la gráfica 4.3.

b. Red ORIGINAL IEEE 30-buses

Con el mismo propósito y finalidad que en el apartado 4.5.2, específicamente en la parte de los resultados de su red original, tras exponer y analizar los resultados de la red estándar IEEE 30-buses, se procede a mostrar los resultados correspondientes al estudio del flujo de cargas fundamental de la red original IEEE 30-buses.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1	DATOS BUSES n30 (Con Q límites)									
2										
3	<i>nbus</i>	<i>V</i>	<i>delta</i>	<i>PG</i>	<i>QG</i>	<i>PD</i>	<i>QD</i>	<i>Qmin</i>	<i>Qmax</i>	<i>Tipo</i>
4	1	1,060	0	260,2	-16,1	0	0	0	0	1
5	2	1,045	0	40	50	21,7	12,7	-40	50	2
6	3	1	0	0	0	2,4	1,2	0	0	3
7	4	1	0	0	0	7,6	1,6	0	0	3
8	5	1,010	0	0	37	94,2	19	-40	40	2
9	6	1	0	0	0	0	0	0	0	3
10	7	1	0	0	0	22,8	10,9	0	0	3
11	8	1,010	0	0	37,3	30	30	-10	40	2
12	9	1	0	0	0	0	0	0	0	3
13	10	1	0	0	0	5,8	2	0	0	3
14	11	1,082	0	0	16,2	0	0	-6	24	2
15	12	1	0	0	0	11,2	7,5	0	0	3
16	13	1,071	0	0	10,6	0	0	-6	24	2
17	14	1	0	0	0	6,2	1,6	0	0	3
18	15	1	0	0	0	8,2	2,5	0	0	3
19	16	1	0	0	0	3,5	1,8	0	0	3
20	17	1	0	0	0	9	5,8	0	0	3
21	18	1	0	0	0	3,2	0,9	0	0	3
22	19	1	0	0	0	9,5	3,4	0	0	3
23	20	1	0	0	0	2,2	0,7	0	0	3

24	21	1	0	0	0	17,5	11,2	0	0	3
25	22	1	0	0	0	0	0	0	0	3
26	23	1	0	0	0	3,2	1,6	0	0	3
27	24	1	0	0	0	8,7	6,7	0	0	3
28	25	1	0	0	0	0	0	0	0	3
29	26	1	0	0	0	3,5	2,3	0	0	3
30	27	1	0	0	0	0	0	0	0	3
31	28	1	0	0	0	0	0	0	0	3
32	29	1	0	0	0	2,4	0,9	0	0	3
33	30	1	0	0	0	10,6	1,9	0	0	3

Figura 4.15. Datos de entrada de los buses de la red ORIGINAL IEEE 30-buses con límites de Q.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1	DATOS BUSES n30 (Sin Q límites)									
2										
3	<i>nbus</i>	<i>V</i>	<i>delta</i>	<i>PG</i>	<i>QG</i>	<i>PD</i>	<i>QD</i>	<i>Qmin</i>	<i>Qmax</i>	<i>Tipo</i>
4	1	1,060	0	260,2	-16,1	0	0	0	0	1
5	2	1,045	0	40	50	21,7	12,7	-500	500	2
6	3	1	0	0	0	2,4	1,2	0	0	3
7	4	1	0	0	0	7,6	1,6	0	0	3
8	5	1,010	0	0	37	94,2	19	-500	500	2
9	6	1	0	0	0	0	0	0	0	3
10	7	1	0	0	0	22,8	10,9	0	0	3
11	8	1,010	0	0	37,3	30	30	-500	500	2
12	9	1	0	0	0	0	0	0	0	3
13	10	1	0	0	0	5,8	2	0	0	3
14	11	1,082	0	0	16,2	0	0	-500	500	2
15	12	1	0	0	0	11,2	7,5	0	0	3
16	13	1,071	0	0	10,6	0	0	-500	500	2
17	14	1	0	0	0	6,2	1,6	0	0	3
18	15	1	0	0	0	8,2	2,5	0	0	3
19	16	1	0	0	0	3,5	1,8	0	0	3
20	17	1	0	0	0	9	5,8	0	0	3
21	18	1	0	0	0	3,2	0,9	0	0	3
22	19	1	0	0	0	9,5	3,4	0	0	3
23	20	1	0	0	0	2,2	0,7	0	0	3
24	21	1	0	0	0	17,5	11,2	0	0	3
25	22	1	0	0	0	0	0	0	0	3
26	23	1	0	0	0	3,2	1,6	0	0	3
27	24	1	0	0	0	8,7	6,7	0	0	3
28	25	1	0	0	0	0	0	0	0	3
29	26	1	0	0	0	3,5	2,3	0	0	3
30	27	1	0	0	0	0	0	0	0	3
31	28	1	0	0	0	0	0	0	0	3
32	29	1	0	0	0	2,4	0,9	0	0	3
33	30	1	0	0	0	10,6	1,9	0	0	3

Figura 4.16. Datos de entrada de los buses de la red ORIGINAL IEEE 30-buses sin límites de Q.

Tabla 4.11. Resultado del estudio de flujo de cargas fundamental de la red ORIGINAL IEEE 30-buses con GS.

Método de GAUSS-SEIDEL								
Bus no.	SIN límites de generación de Q				CON límites de generación de Q			
	V (p.u)	δ (deg.)	P _i (p.u)	Q _i (p.u)	V (p.u)	δ (deg.)	P _i (p.u)	Q _i (p.u)
1	1,0600	0,0000	2,6098	-0,3497	1,0600	0,0000	2,6101	-0,3160
2	1,0450	-5,3491	0,1830	0,1815	1,0450	-5,3643	0,1830	0,2504
3	1,0362	-7,7262	-0,0240	-0,0120	1,0307	-7,6452	-0,0240	-0,0120
4	1,0299	-9,4895	-0,0760	-0,0160	1,0231	-9,3957	-0,0760	-0,0160
5	1,0100	-14,0530	-0,9420	0,0783	1,0100	-14,1079	-0,9420	0,1032
6	1,0199	-11,1262	0,0000	0,0000	1,0151	-11,1057	0,0000	0,0000
7	1,0090	-12,8689	-0,2280	-0,1090	1,0062	-12,8812	-0,2280	-0,1090
8	1,0100	-11,7080	-0,3000	-0,2347	1,0100	-11,7723	-0,3000	-0,0965
9	1,0228	-14,3132	0,0000	0,0000	1,0026	-14,4163	0,0000	0,0000
10	1,0069	-16,0582	-0,0580	-0,0200	0,9842	-16,2621	-0,0580	-0,0200
11	1,0820	-14,3132	0,0000	0,3078	1,0501	-14,4163	0,0000	0,2400
12	1,0114	-15,1799	-0,1120	-0,0750	0,9752	-15,1465	-0,1120	-0,0750
13	1,0710	-15,1799	0,0000	0,4556	1,0085	-15,1465	0,0000	0,2400
14	0,9966	-16,1488	-0,0620	-0,0160	0,9618	-16,1873	-0,0620	-0,0160
15	0,9925	-16,2592	-0,0820	-0,0250	0,9595	-16,3518	-0,0820	-0,0250
16	1,0016	-15,8549	-0,0350	-0,0180	0,9708	-15,9743	-0,0350	-0,0180
17	1,0000	-16,2226	-0,0900	-0,0580	0,9747	-16,4028	-0,0900	-0,0580
18	0,9849	-16,9447	-0,0320	-0,0090	0,9551	-17,1241	-0,0320	-0,0090
19	0,9837	-17,1430	-0,0950	-0,0340	0,9559	-17,3595	-0,0950	-0,0340
20	0,9886	-16,9345	-0,0220	-0,0070	0,9621	-17,1524	-0,0220	-0,0070
21	0,9930	-16,5289	-0,1750	-0,1120	0,9700	-16,7489	-0,1750	-0,1120
22	0,9933	-16,5108	0,0000	0,0000	0,9702	-16,7279	0,0000	0,0000
23	0,9822	-16,6725	-0,0320	-0,0160	0,9531	-16,8253	-0,0320	-0,0160
24	0,9771	-16,8466	-0,0870	-0,0670	0,9536	-17,0516	-0,0870	-0,0670
25	0,9680	-16,3059	0,0000	0,0000	0,9516	-16,5420	0,0000	0,0000
26	0,9493	-16,7703	-0,0350	-0,0230	0,9327	-17,0229	-0,0350	-0,0230
27	0,9713	-15,6876	0,0000	0,0000	0,9596	-15,9284	0,0000	0,0000
28	1,0162	-11,7293	0,0000	0,0000	1,0115	-11,7351	0,0000	0,0000
29	0,9502	-17,0558	-0,0240	-0,0090	0,9383	-17,3310	-0,0240	-0,0090
30	0,9381	-18,0414	-0,1060	-0,0190	0,9259	-18,3423	-0,1060	-0,0190
	Total de iteraciones = 639				Total de iteraciones = 422			
	Tolerancia = 1,0E-10				Tolerancia = 1,0E-06			
	Rendimiento de la Red = 93,70 %				Rendimiento de la Red = 93,69 %			

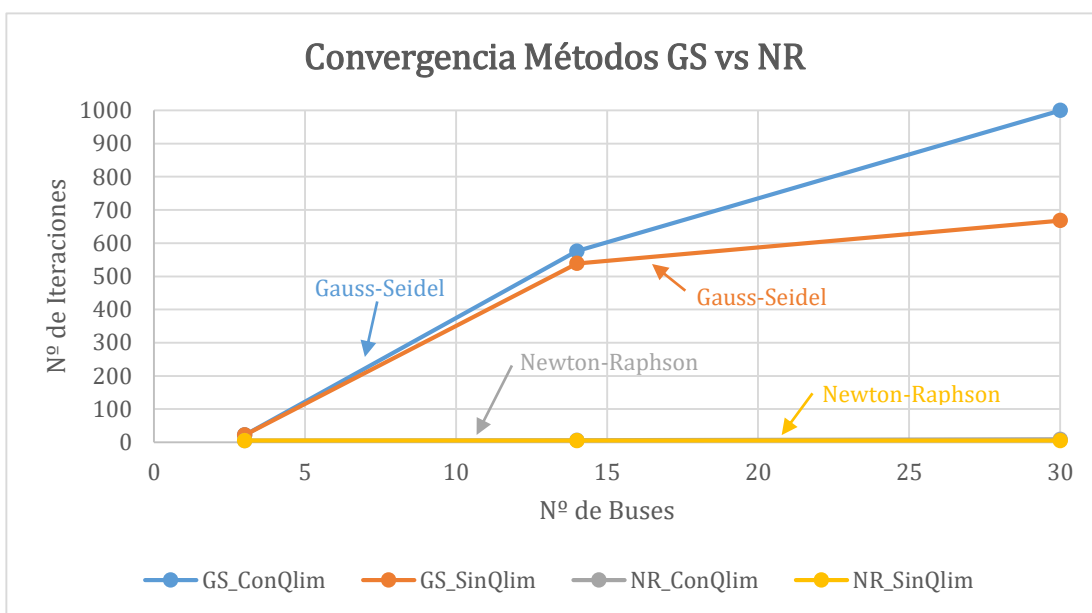
Tabla 4.12. Resultado del estudio de flujo de cargas fundamental de la red ORIGINAL IEEE 30-buses con NR.

Método de NEWTON-RAPHSON								
Bus no.	SIN límites de generación de Q				CON límites de generación de Q			
	V (p.u)	δ (deg.)	P _i (p.u)	Q _i (p.u)	V (p.u)	δ (deg.)	P _i (p.u)	Q _i (p.u)
1	1,0600	0,0000	2,6098	-0,3497	1,0600	0,0000	2,6104	-0,3153
2	1,0450	-5,3491	0,1830	0,1815	1,0450	-5,3652	0,1830	0,2526
3	1,0362	-7,7262	-0,0240	-0,0120	1,0306	-7,6445	-0,0240	-0,0120
4	1,0299	-9,4895	-0,0760	-0,0160	1,0230	-9,3949	-0,0760	-0,0160
5	1,0100	-14,0530	-0,9420	0,0783	1,0100	-14,1103	-0,9420	0,1043
6	1,0199	-11,1262	0,0000	0,0000	1,0149	-11,1045	0,0000	0,0000
7	1,0090	-12,8689	-0,2280	-0,1090	1,0061	-12,8815	-0,2280	-0,1090
8	1,0100	-11,7080	-0,3000	-0,2347	1,0097	-11,7694	-0,3000	-0,1000
9	1,0228	-14,3132	0,0000	0,0000	1,0023	-14,4171	0,0000	0,0000
10	1,0069	-16,0582	-0,0580	-0,0200	0,9840	-16,2640	-0,0580	-0,0200
11	1,0820	-14,3132	0,0000	0,3078	1,0499	-14,4171	0,0000	0,2400
12	1,0114	-15,1799	-0,1120	-0,0750	0,9750	-15,1485	-0,1120	-0,0750
13	1,0710	-15,1799	0,0000	0,4556	1,0084	-15,1485	0,0000	0,2400
14	0,9966	-16,1488	-0,0620	-0,0160	0,9616	-16,1897	-0,0620	-0,0160
15	0,9925	-16,2592	-0,0820	-0,0250	0,9593	-16,3541	-0,0820	-0,0250
16	1,0016	-15,8549	-0,0350	-0,0180	0,9706	-15,9763	-0,0350	-0,0180
17	1,0000	-16,2226	-0,0900	-0,0580	0,9745	-16,4047	-0,0900	-0,0580
18	0,9849	-16,9447	-0,0320	-0,0090	0,9549	-17,1268	-0,0320	-0,0090
19	0,9837	-17,1430	-0,0950	-0,0340	0,9557	-17,3621	-0,0950	-0,0340
20	0,9886	-16,9345	-0,0220	-0,0070	0,9619	-17,1549	-0,0220	-0,0070
21	0,9930	-16,5289	-0,1750	-0,1120	0,9698	-16,7510	-0,1750	-0,1120
22	0,9933	-16,5108	0,0000	0,0000	0,9700	-16,7300	0,0000	0,0000
23	0,9822	-16,6725	-0,0320	-0,0160	0,9529	-16,8276	-0,0320	-0,0160
24	0,9771	-16,8466	-0,0870	-0,0670	0,9533	-17,0537	-0,0870	-0,0670
25	0,9680	-16,3059	0,0000	0,0000	0,9514	-16,5436	0,0000	0,0000
26	0,9493	-16,7703	-0,0350	-0,0230	0,9324	-17,0247	-0,0350	-0,0230
27	0,9713	-15,6876	0,0000	0,0000	0,9593	-15,9294	0,0000	0,0000
28	1,0162	-11,7293	0,0000	0,0000	1,0112	-11,7338	0,0000	0,0000
29	0,9502	-17,0558	-0,0240	-0,0090	0,9380	-17,3327	-0,0240	-0,0090
30	0,9381	-18,0414	-0,1060	-0,0190	0,9257	-18,3445	-0,1060	-0,0190
	Total de iteraciones = 5				Total de iteraciones = 7			
	Tolerancia = 1,0E-12				Tolerancia = 1,0E-12			
	Rendimiento de la Red = 93,70 %				Rendimiento de la Red = 93,69 %			

4.5.4. Comparación de convergencia GS vs NR

Después de obtener, analizar y justificar los resultados extraídos, además de comparar la convergencia de ambos métodos, para cada una de las redes eléctricas IEEE n-buses estudiadas, se propone, a modo de conclusión y comparación final, un estudio general de la convergencia de Gauss-Seidel respecto a Newton-Raphson. Todo ello con la finalidad de observar el comportamiento, en el aspecto de las iteraciones necesarias para converger, a medida que se aumenta el número de buses de la red.

Con tal de facilitar la comprensión de dicho estudio comparativo, se ha realizado y expuesto, a continuación, la gráfica 4.4. Dicha gráfica muestra la tendencia que rige la convergencia con el número de buses para cada caso expuesto, es decir, representa el número de iteraciones que serán necesarias para converger a medida que aumenta el número de buses en cada tipología de red. Todos los valores utilizados han sido extraídos de los resultados de las redes estándar IEEE n-buses estudiadas en los puntos anteriores de este cuarto apartado del proyecto.



Gráfica 4.4. Comparación de la evolución de la convergencia respecto al número de buses de GS vs NR.

Tal como se ha ido observando y comentando en los respectivos análisis de cada una de las tres redes estudiadas, en la gráfica 4.4 se puede ver de un modo más claro, como NR se consolida como el método con mejores prestaciones en cuanto a número de iteraciones necesarias y a no problemas convergencia se refiere. Asimismo, se aprecia cómo según mayor sea el número de buses de la red, GS requiere de un número elevado de iteraciones y, en cierto punto, presenta problemas de convergencia, frente que, por otro lado, NR se establece con todo lo contrario, el número de buses de la red no le influye de manera notoria ni en su cómputo ni en su convergencia, teniendo en casi todos los casos el mismo número de iteraciones.

Analizando los datos y las líneas de tendencia representados en la gráfica 4.4, para así cuantificar de un modo numérico las afirmaciones realizadas en el párrafo anterior, se muestra como para los casos de NR se aprecia una línea casi constante y sin apenas pendiente, dónde los valores que toma son de 5 iteraciones, para ambos casos, en la red de 3 buses, seguidamente, 5 y 6 iteraciones para las redes de 14 buses y, finalmente, termina la curva en 5 y 9 iteraciones para las redes de 30 buses. Dichos valores de NR implican un pendiente máximo positivo de 3 iteraciones por cada 16 buses, es decir, se necesitarán añadir como mucho 0,19 iteraciones por cada bus extra. En el caso de GS, tal como se espera, el número de iteraciones necesarias se eleva notablemente al aumentar la cantidad de buses, dónde en la red de 3 buses son necesarias 22 iteraciones para ambos casos, posteriormente, para las redes de 14 buses se alcanzan las 539 y 576 iteraciones y, para terminar con los puntos de las curvas de GS, cuando la red es de 30 buses, las iteraciones aumentan hasta las 668 y en más de 1000 (ya que presenta problemas de convergencia a partir de este punto). Estos puntos característicos de las curvas representadas para GS, implican un pendiente máximo positivo de 554 iteraciones por cada 11 buses, es decir, serán necesarias como mucho 50,36 iteraciones extra por cada bus que se incorpore.

De esta forma se puede dar por finalizado el estudio de comparación de ambos métodos numéricos, dónde Newton-Raphson, a pesar de su mayor complejidad de preparación cuando no hay realizado un código automatizado y programado, presenta una cuantificada mejor convergencia en todos los aspectos, hecho que viene caracterizado por tener una convergencia cuadrática. Así pues, debido a que en este estudio se ha creado un código propio completamente automatizado (Anexo B), dónde únicamente se debe colocar los datos de la red en una hoja *Excel*, tal como se especifica en los apartados 3.2.1 y 4.4, y el mismo programa te estructura internamente todo y formula él mismo todas las ecuaciones, el hecho de que la preparación de las mismas sea más compleja no influye en nada, por lo tanto, emplear el método de NR se establece como el preferente.

5. Estudio del flujo armónico de cargas en redes IEEE n-buses cuando en ellas hay presencia de cargas no lineales

En el apartado 4 de este proyecto se ha justificado la necesidad que existe en cuanto a resolver el flujo de cargas fundamental de un sistema eléctrico de potencia. Dicho estudio supone que todos los componentes de la red tienen un comportamiento lineal, entonces, proporciona todas las tensiones, intensidades y potencias a la frecuencia fundamental (50 Hz en España). Sin embargo, con el auge y la introducción de elementos provenientes de la electrónica de potencia, ha conllevado a la aparición de cargas no lineales en la red. Estos tipos de cargas distorsionan las formas de onda sinusoidales de las tensiones y corrientes, ya que incluso, en algunos casos, dichas cargas llegan a presentar un funcionamiento en régimen permanente de su onda periódica de carácter no sinusoidal. Por lo tanto, en el desarrollo del estudio del flujo armónico de cargas se pretende cuantificar y medir, para cada bus de la red, el nivel de distorsión existente, es decir, determinar las distintas componentes armónicas de tensión a partir del desarrollo en serie de Fourier, donde su armónico fundamental se encontrará en 50 Hz. [14]

Al estudio del flujo armónico de cargas (HLF) se le entiende como una extensión del flujo de cargas fundamental, donde en este, se parte con el conocimiento de que las tensiones e intensidades de la red se encuentran distorsionadas a causa de las cargas no lineales introducidas en la misma. Entonces, para este caso, el objetivo se encuentra en hallar los armónicos característicos de tensión (los cuales se especificarán y argumentarán posteriormente) en todos los buses del SEP. Además, en este estudio se empleará el método de resolución de la penetración de armónicos (Harmonic Penetration) que se explicará detalladamente en el apartado 5.3.

Cabe remarcar la importancia de este estudio, ya que la distorsión de la forma de onda propicia a distintos efectos negativos en la red, por lo tanto, este efecto debe tenerse en consideración con tal de reducirse y/o eliminarse en la medida de lo posible. Tal como se indica en [14], algunos de los efectos negativos que conllevan son:

- Deterioro del aislamiento, por efectos de las tensiones armónicas, en especial en los condensadores.
- Efectos térmicos, debido a la circulación de corrientes armónicas. Producen pérdidas en el cobre de los circuitos eléctricos y/o en el hierro de los circuitos magnéticos.
- Disrupción de la carga, siendo una operación anormal o fallo, debido a la distorsión de tensión. Dichos efectos se manifiestan en malos funcionamientos de los relés o de los aparatos electrónicos conectados en las redes.

Por último, para el estudio del flujo armónico de cargas de este proyecto, se ha estipulado a la red IEEE 14-buses como el SEP que se estudiará con tal de observar la influencia de las cargas no lineales en esta. Sus correspondientes datos, características y modificaciones se encuentran estipuladas en el apartado 5.4.1 y han sido extraídas e interpretadas de [15].

5.1. Concepto de distorsión armónica en señales periódicas

En el campo de la ingeniería eléctrica, se define armónico como las “*tensiones o corrientes sinusoidales con frecuencias múltiplos enteros de la frecuencia de suministro*” [14]. Los armónicos conllevan a la aparición del fenómeno de distorsión de la onda en el régimen permanente de los sistemas de corriente alterna.

Este apartado, parte con la finalidad de presentar una serie de conceptos teóricos para facilitar la comprensión de la distorsión armónica, la cual queda amparada en el marco de estudio del problema del flujo armónico de cargas.

5.1.1. Serie de Fourier

Partiendo de la base que los armónicos de tensión y corriente son ondas periódicas con frecuencias múltiples a la de suministro (50 Hz en España), se define a la onda principal como la suma de la onda de frecuencia fundamental con las ondas de los armónicos, es decir, se desarrolla su correspondiente serie de Fourier. [16][17]

$$f(t) = C_0 + \sum_{n=1}^{\infty} C_n \cdot \cos(n\omega t + \theta_n) \quad (\text{Eq. 5.1})$$

Se define a los coeficientes C_n y ángulos de fase θ_n para los n-th armónicos como:

$$C_n = \sqrt{A_n^2 + B_n^2} \quad ; \quad \theta_n = \tan^{-1}\left(\frac{-B_n}{A_n}\right) \quad (\text{Eq. 5.2})$$

Donde $\omega = 2\pi f$ (pulsación a frecuencia f) y C_0 corresponde al coeficiente en corriente continua de la función.

Asimismo, al valor eficaz (RMS) de la función se le define como:

$$A_n = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \cdot \cos(n\omega t) dt \quad ; \quad B_n = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \cdot \sin(n\omega t) dt \quad (\text{Eq. 5.3})$$

$$C_0 = \frac{1}{T} \int_0^T f(t) dt \quad (\text{Eq. 5.4})$$

$$RMS = \sqrt{C_0^2 + \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{C_n}{\sqrt{2}}\right)^2} \quad (\text{Eq. 5.5})$$

Dicha serie de Fourier puede ser desarrollada para distintos casos, ya que la relación no lineal entre voltaje y corriente puede conducir a varias formas de distorsión de la onda periódica. Estas se resumen en [16][17]:

- Hay estado estacionario periódico y la forma de onda distorsionada se expresa con una serie de Fourier a una frecuencia fundamental igual a la frecuencia de potencia.
- Hay estado estacionario periódico y la forma de onda distorsionada se expresa con una serie de Fourier a una frecuencia fundamental la cual es submúltiplo de la frecuencia de potencia.
- La forma de onda es aperiódica, todo y que en algunos casos periódica. Puede existir una expansión en serie trigonométrica con tal de ser una representación exacta o aproximada de la solución.

Comúnmente, en los estudios de armónicos se emplea el primer caso, siendo también el caso de este proyecto, ya que dicha representación en Fourier se hará en base a la frecuencia fundamental de 50 Hz, dónde se observarán las características enunciadas y, además, las cargas no lineales que habrán presentan este tipo de comportamiento.

El segundo caso puede venir ocasionado por ciertos tipos de cargas pulsadas o moduladas o, bien, por controladores de ciclo integral. Por último, para la tercera categoría, ésta aparece en algunas situaciones prácticas, por ejemplo, cuando los hornos de arco de CC se utilizan a unas ciertas condiciones y durante un periodo de tiempo, dónde también es necesario incorporar y, por lo tanto, influye directamente, un rectificador en el proceso.

5.1.2. Distorsión armónica total

En el ámbito de estudio de los armónicos existen distintos indicadores de distorsión, aun así, el mayormente utilizado como herramienta de medida para cuantificar el nivel de distorsión de la forma de onda respecto a una senoide pura, es la distorsión armónica total (THD).

$$THD = \left(\frac{1}{C_1} \cdot \sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} C_n^2} \right) \cdot 100 (\%) \quad (\text{Eq. 5.6})$$

Además, cabe decir que, para complementar al THD, también se puede representar el espectro armónico en un diagrama de barras. Dicho espectro armónico está basado en la descomposición armónica individual de tal manera que se pueda cuantificar la magnitud que presenta dicho armónico en comparación al armónico fundamental.

5.1.3. Definición de potencia con armónicos

Trasladando al ámbito eléctrico el concepto de descomposición de ondas periódicas en serie de Fourier, respecto a definir las corrientes y tensiones de la red como sumas periódicas de todas sus componentes armónicas, se expondrían ambos parámetros tal que así (donde el término de CC se ha omitido por conveniencia) [16][17]:

$$i(t) = \sum_{n=1}^{\infty} \sqrt{2} \cdot I_n \cdot \cos(n\omega t + \theta_{in}) \quad (\text{Eq. 5.7})$$

$$v(t) = \sum_{n=1}^{\infty} \sqrt{2} \cdot V_n \cdot \cos(n\omega t + \theta_{in}) \quad (\text{Eq. 5.8})$$

Siendo la potencia instantánea el producto de las funciones tensión por corriente:

$$p(t) = v(t) \cdot i(t) \quad (\text{Eq. 5.9})$$

La potencia activa o real (P), representa la potencia promedio entregada en régimen estacionario, desarrollada como:

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T p(t) dt = \sum_{n=1}^{\infty} V_n \cdot I_n \cdot \cos(\theta_{vn} - \theta_{in}) \quad (\text{Eq. 5.10})$$

Asimismo, también se define la potencia reactiva o imaginaria (Q) como:

$$Q = \sum_{n=1}^{\infty} V_n \cdot I_n \cdot \sin(\theta_{vn} - \theta_{in}) \quad (\text{Eq. 5.11})$$

Dónde la potencia compleja o aparente (S) se debe calcular del siguiente modo:

$$S = \sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} (V_n \cdot I_n)^2} \quad (\text{Eq. 5.12})$$

En circuitos donde se menosprecia o, bien, no se considera la interacción de los armónicos con los componentes del mismo, se podría definir al conjunto de potencias con el característico y denominado triángulo de potencias de S, P y Q. Todo y eso, considerando la presencia de este factor distorsionante de la red (armónicos), aparece un nuevo término, el cual se le considera como distorsión en volt-ampere y se transcribe con una D. Por lo tanto, el correspondiente triángulo de potencias quedaría como:

$$S^2 = P^2 + Q^2 + D^2 \quad (\text{Eq. 5.13})$$

5.1.4. Armónicos característicos

En los sistemas eléctricos de potencia, donde el sistema energético de distribución es en corriente alterna trifásica, no se cuantifican a todos los armónicos en la misma medida, hecho que se argumenta a continuación.

En primer lugar, en la mayor parte de las situaciones se produce el fenómeno de simetría de semionda. La simetría de semionda se expresa como la propiedad de que se cumpla la relación de $u(t) = -u(t + \frac{\pi}{\omega})$, implicando así que la forma de onda del semiciclo negativo a frecuencia fundamental sea exactamente la misma, pero opuesta, a la forma de onda del semiciclo positivo. Entonces, por el hecho de que los armónicos pares no cumplen con dicha condición respecto a la frecuencia fundamental, no se les considera o se menosprecian por su muy reducido valor.

Posteriormente, en los sistemas eléctricos equilibrados con secuencia directa de fases en la alimentación, las ondas de tensión y corriente se encuentran desfasadas $2\pi/3$ radianes (120°) entre ellas, pudiéndose afirmar lo siguiente:

$$u_a(t) = \sqrt{2} \cdot \sum_{n=1}^{\infty} V_k \cdot \sin(n\omega t + \theta_n) \tag{Eq. 5.14}$$

$$u_b(t) = u_a\left(t - \frac{2\pi}{3\omega}\right) \quad ; \quad u_c(t) = u_a\left(t + \frac{2\pi}{3\omega}\right) \tag{Eq. 5.15}$$

Particularizando las dos ecuaciones anteriores del mismo modo que en [14] se extrae la siguiente tabla:

Tabla 5.1. Secuenciación de los armónicos en redes eléctricas equilibradas.

n	Fase A	Fase B	Fase C	Secuencia tipo
	θ_n	$\theta_n - n2\pi/3$	$\theta_n + n2\pi/3$	-
1	θ_1	$\theta_1 - 2\pi/3$	$\theta_1 + 2\pi/3$	Directa
2	θ_2	$\theta_2 + 2\pi/3$	$\theta_2 - 2\pi/3$	Inversa
3	θ_3	θ_3	θ_3	Homopolar
4	θ_4	$\theta_4 - 2\pi/3$	$\theta_4 + 2\pi/3$	Directa
5	θ_5	$\theta_5 + 2\pi/3$	$\theta_5 - 2\pi/3$	Inversa
6	θ_6	θ_6	θ_6	Homopolar
7	θ_7	$\theta_7 - 2\pi/3$	$\theta_7 + 2\pi/3$	Directa

Analizando la tabla anterior, se puede observar que la secuencia (directa-inversa-homopolar) se va repitiendo cíclicamente cada tres armónicos. Además, cabe decir que en sistemas eléctricos trifásicos de tres hilos (modelo de las redes de potencia) no pueden existir corrientes homopolares, por el hecho que sus vectores se encuentran secuenciados de manera directa o indirecta y desfasados 120° entre sí, siempre que se considere al sistema equilibrado y en régimen permanente.

Así pues, considerando las dos restricciones previas, se llega a la conclusión que en los sistemas trifásicos equilibrados de tres hilos (sin neutro) y con simetría de semionda, sólo existirán los armónicos cuyo orden cumpla con $n = 6p \pm 1$, siendo $p=1, 2, \dots, \infty$. Por lo tanto, y de cara al estudio posterior, se considerarán como los armónicos característicos: $n = 1, 5, 7, 11, 13, 17, 19, 23, 25, 29$.

5.2. Modelización armónica de los elementos de un SEP

En el apartado 2 se llevó a cabo un primer análisis de los componentes principales que conformaban un SEP, donde a estos se les consideraba modelos a frecuencia fundamental, es decir, no se tenía en cuenta posibilidad alguna sobre existencia de armónicos, por lo tanto, se definen como elementos lineales. Así pues, en este apartado, adicionalmente a la primera modelización, se presenta un segundo tipo de componente, definiéndose como elementos no lineales, las cuales, en su respectivo subapartado, se expondrán y argumentarán junto con su modelización armónica. También decir que, para los elementos lineales, del mismo modo que con los no lineales, se presentarán sus respectivas modelizaciones armónicas en el dominio de la frecuencia.

De un comienzo, a las cargas lineales se las representa mediante relaciones algebraicas lineales, constituidas por una impedancia, cuyo valor se modifica según la frecuencia del armónico en el cual se le considere. Por otro lado, a las cargas no lineales se las modeliza a partir de una serie de ecuaciones no lineales, las cuales describen las relaciones entre tensiones y corrientes armónicas. Entonces, consecuentemente, no se les puede asimilar a un comportamiento de una impedancia, sino que, por ejemplo, tal como se verá para el caso de los convertidores HVDC y los SVC, sus modelizaciones vienen dadas mediante una fuente de corriente independiente.

En los siguientes subapartados, se presentan los modelos correspondientes a los elementos (lineales y no lineales) que se encontrarán en el posterior estudio del flujo armónico de cargas.

5.2.1. Modelo armónico líneas de transporte

Tal como se describe en el apartado 2.1.2, el circuito equivalente final simplificado de una línea aérea de transporte se rige por las ecuaciones 2.1 y 2.2 y se representa con el esquema "pi" equivalente de la figura 2.4.

Así pues, para empezar con la modelización armónica de las líneas de transporte, se define que los parámetros de resistencia (R) y conductancia (G) son los mismos que a frecuencia fundamental. Por otro lado, siendo aquí donde se encuentra la diferencia respecto al modelo no armónico, a la hora de modelizar las reactancias (X) y las susceptancias (B), se debe multiplicar el valor suyo propio, en condiciones de frecuencia fundamental, por el número del armónico en el cual se

encuentre, tal como se muestra en las siguientes dos ecuaciones. Por último, dichas ecuaciones sirven para todos los órdenes de armónicos, desde el fundamental al armónico “h = ∞”.

$$Z_T^h = R^h + jX_L^h = R^1 + jX_L^1 \cdot h ; \quad h \geq 1 \tag{Eq. 5.16}$$

$$Y_T^h = G^h + jB_C^h = G^1 + jB_C^1 \cdot h ; \quad h \geq 1 \tag{Eq. 5.17}$$

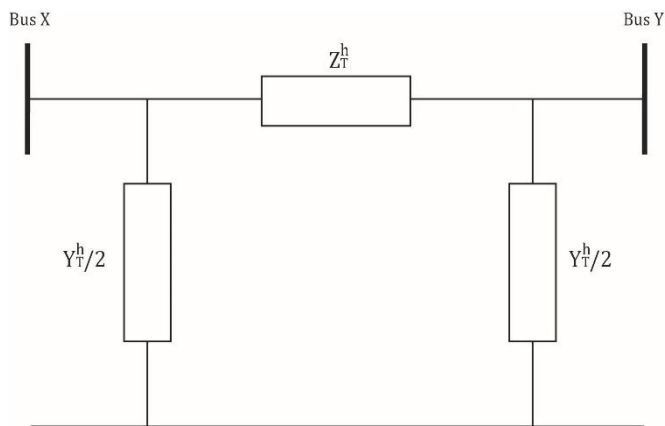


Figura 5.1. Esquema "pi" del circuito equivalente armónico de una línea eléctrica de transporte para h ≥ 1.

5.2.2. Modelo armónico transformadores

Para este caso, a los transformadores se les modeliza del modo mas simple que existe, es decir, por una parte, se le considera como una línea corta, dónde unicamente hay la impedancia longitudinal Z_{TR} y, después, el factor de regulación del mismo es siempre de a=1. Por otro lado, al igual que en la Z del modelo de las líneas, la resistencia es la misma que a frecuencia fundamental y la reactancia equivale al producto de la X a frecuencia fundamental por el número del armónico. Dicha representación es equivalente para todo orden de armónico. Todo ello viene representado en la ecuación 5.18 y en la figura 5.2.

$$Z_{TR}^h = R_{TR}^h + jX_{TR}^h = R_{TR}^1 + jX_{TR}^1 \cdot h ; \quad h \geq 1 \tag{Eq. 5.18}$$

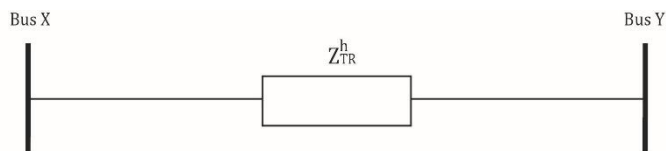


Figura 5.2. Esquema del modelo armónico de un transformador para h ≥ 1.

Por otro lado, en el artículo [15], del cual se ha extraído los datos para la red estudiada en el apartado 5.5, se observa que en la tabla de datos de entrada existen transformadores tanto con configuración estrella-estrella como estrella-triángulo. Esto, para este estudio armónico, no tiene ninguna influencia, ya que todas las cargas que se estudian son trifásicas y, por lo tanto, como en cargas trifásicas los armónicos múltiplos de 3 son nulos, tal como se ha justificado en el apartado 5.1.4, entonces, que haya una u otra configuración no será relevante. Por lo tanto, conociendo dicha característica, se vuelve a citar al modelo del transformador descrito en este punto como una línea corta y sin factor de regulación. Sin embargo, en el caso de tener cargas no trifásicas, dicho modelo no sería correcto.

5.2.3. Modelo armónico generadores del sistema (bus Slack o PV)

Para el caso de los generadores, cabe distinguir dos tipos de modelización a partir del punto en el cual se hace la consideración de presencia de armónicos. Por una parte, cuando se está trabajando en el armónico de frecuencia fundamental ($h=1$) se le modeliza tal como un bus Slack o PV, es decir, como se hacía en el flujo de cargas fundamental. Además, también para este caso, no se tendrá en consideración los límites de generación de potencia reactiva, por lo tanto, se trabajará sin límites de Q en estos buses. Posteriormente, más allá del primer armónico ($h>1$), aparece una modelización distinta, ya que al generador se lo considera como una reactancia subtransitoria conectada entre el bus Slack o PV y tierra [15], la cual se rige por el modelo matemático de la ecuación 5.19 y se representa a partir del esquema de la figura 5.3.

$$Z_G^h = jX_G^h = jX_G^1 \cdot h ; \quad h > 1 \quad (\text{Eq. 5.19})$$

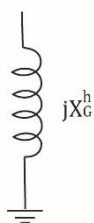


Figura 5.3. Esquema del circuito equivalente armónico de un generador para $h>1$.

5.2.4. Modelo armónico cargas lineales del sistema

En cuanto a las cargas lineales de la red, las cuales en el estudio del flujo de cargas fundamental se encontraban conectadas a los denominados buses PQ, presenta una distinción en dos intervalos al igual que los generadores. Para empezar, a frecuencia fundamental ($h=1$) se comporta tal como un bus PQ, donde la relevancia de este se encuentra en la potencia demandada por el mismo. Así pues, para armónicos superiores al de orden 1 ($h>1$), se les modeliza a partir de dos impedancias conectadas en paralelo entre bus PQ y tierra, tal como representa la figura 5.4. Asimismo, para obtener los valores de los parámetros para cada armónico estudiado, se deben usar las siguientes

ecuaciones, donde éstas son función de ciertas variables extraídas del correspondiente flujo de cargas fundamental modificado que se explicará en el apartado 5.3. [18]

$$R_C^h = R_{50Hz} = \frac{V_{50Hz}^2}{P_D} \quad (\text{Eq. 5.20})$$

$$X_{SC}^h = 0,073 \cdot h \cdot R_{50Hz} \quad (\text{Eq. 5.21})$$

$$X_{PC}^h = \frac{h \cdot R_{50Hz}}{6,7 \cdot \tan(\varphi_{50Hz}) - 0,74} \quad (\text{Eq. 5.22})$$

$$\tan(\varphi_{50Hz}) = \frac{Q_D}{P_D} \quad (\text{Eq. 5.23})$$

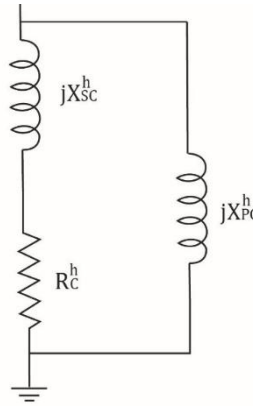


Figura 5.4. Esquema del circuito equivalente armónico de una carga lineal para $h > 1$.

5.2.5. Modelo filtro de armónicos y banco de condensadores

Tanto los filtros de armónicos como los bancos de condensadores presentan una función moduladora en el comportamiento del sistema. Por un lado, sirven para atenuar el impacto de ciertos armónicos en las componentes de la red y, por otro lado, para compensar el nivel de potencia reactiva con, por ejemplo, una finalidad elevadora de tensión en ciertos buses. A ambos elementos se les modeliza mediante una impedancia shunt entre bus y tierra, tal como representa la figura 5.5, donde cabe decir que, los filtros de armónicos, mayormente, tendrán en su modelo las tres variables presentes (R, X y B) y, por el contrario, los condensadores únicamente presentarán una susceptancia (B). Entonces, para poder obtener la impedancia equivalente del modelo circuital para todo orden de armónico, se debe aplicar la ecuación 5.24.

$$Z_F^h = R_F^h + j \cdot \left(X_F^h - \frac{1}{B_F^h} \right) = R_F^1 + j \cdot \left(h \cdot X_F^1 - \frac{1}{h \cdot B_F^1} \right) ; \quad h \geq 1 \quad (\text{Eq. 5.24})$$

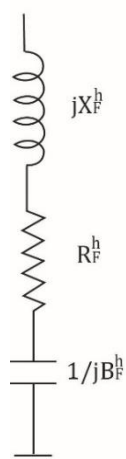


Figura 5.5. Esquema del circuito equivalente de un filtro de armónicos para $h \geq 1$.

Adicionalmente al modelo matemático de los filtros de armónicos, también se quiere mostrar de qué manera se modelizan y qué finalidad persiguen. Tal como se ha dicho, los filtros se usan para mitigar, reducir e incluso eliminar ciertos armónicos en los elementos del sistema. Es decir, por ejemplo, da el caso en una situación determinada que en el quinto armónico de tensión del bus “i” aparece un pico muy elevado, por lo tanto, ya que no interesa su presencia en el sistema por sus ya conocidas negativas consecuencias, entonces, se lleva a cabo un proceso de diseño del filtro. Primero se estima matemáticamente que valores deberían tomar sus componentes de reactancia (X) y susceptancias (B) para así, en segundo lugar, buscar en el mercado un modelo que se ajuste a las características o, bien, crearlo uno mismo, para que, finalmente, conectarlo en el bus que corresponda donde cumplirá la función de, según como, eliminar el armónico $h=5$ por completo. Así pues, la formulación matemática que ayuda a calcular la frecuencia de sintonización del filtro, según la X y la B propias internas, es la mostrada en la ecuación 5.25.

$$h_{sint} \cdot X_F^1 - \frac{1}{h_{sint} \cdot B_F^1} = 0 \rightarrow h_{sint} = \sqrt{\frac{1}{X_F^1 \cdot B_F^1}} \quad (\text{Eq. 5.25})$$

5.2.6. Modelo convertidor HVDC y SVC

En la introducción del flujo armónico de cargas se habla sobre la aparición de cargas no lineales en el sistema, siendo estas las detonantes de la aparición de los armónicos junto con sus respectivas consecuencias. Es por ello, que este apartado se encuentra destinado a definir los dos tipos de cargas no lineales que se encontrarán en el estudio de la red posterior.

- *Convertidor HVDC:*

El convertidor HVDC (High Voltage Direct Current) es un tipo de convertidor, el cual transforma energía eléctrica en corriente alterna de alta tensión a corriente continua de alta tensión, o viceversa. En este estudio se le define mediante la configuración descrita en [19] y expuesta en la

figura 5.7, dónde se presenta como un rectificador de puente de doce pulsos descompuesto en dos de seis pulsos en paralelo, además, este presenta el fenómeno de cancelación armónica. Dicho convertidor HVDC, se verá conectado en el bus 3, tal como se muestra en la figura 5.6 y 5.8, y se dividirá en dos rectificadores independientes de seis pulsos cada uno, los cuales estarán conectados tras dos transformadores, con configuraciones, por un lado, Yy (estrella-estrella) y, por el otro, Yd (estrella-triángulo). Este tipo de configuración implicará, de cara al cálculo de las corrientes inyectadas en los buses para $h > 1$, las cuales se expondrán en las ecuaciones 5.26, 5.27 y 5.28, en que para el convertidor conectado tras el transformador Yy no habrá cambios, pero para el convertidor conectado tras el transformador Yd se deberá modificar ciertos ángulos del espectro de armónicos, tal como se muestra en la tabla 5.2. Así pues, si se aplica la primera ley de Kirchhoff al bus dónde se encuentra el convertidor HVDC frecuencia a frecuencia, la corriente que sale de dicho nudo y, por lo tanto, la que inyecta el convertidor HVDC de 12 pulsos a la red, presenta la evolución en el dominio del tiempo y el espectro en el dominio de la frecuencia que se muestran en las figuras 5.9 y 5.10, respectivamente. Entonces, analizando ambos gráficos, se observa que, por el fenómeno de cancelación armónica, únicamente quedan con una magnitud considerable los armónicos $h = [1, 11, 13, 23, 25]$ (suma de fasores de corriente no nula por estar los fasores en fase) y, asimismo, el resto de armónicos desaparecen (suma de fasores de corriente nula por estar los fasores en oposición de fase). Adicionalmente, con tal de reducir el impacto de los armónicos más cercanos al fundamental de dicho espectro, cabe decir que sería conveniente introducir un filtro sintonizado a $h=12$ con tal de mitigar los efectos de los armónicos $h = [11, 13]$ simultáneamente.

Así pues, en referencia a su modelización en los SEP, se lleva a cabo una distinción según el tipo de estudio que se lleve a cabo. Entonces, para el estudio del flujo de cargas fundamental modificado, es decir, a frecuencia fundamental ($h=1$), se le modeliza como una carga convencional conectada a un bus de tipología PQ y, por otro lado, en el estudio armónico del sistema ($h > 1$) se le modeliza como dos fuentes de corriente independientes (figura 5.11) cuyos valores de corriente se obtienen tal como se especificará más adelante.

- *SVC:*

A los SVC (Static VAR Compensators) se les conoce como un tipo de aparamenta eléctrica la cual proporciona energía de tipo reactiva en redes de alta tensión. En este tipo de carga no lineal no se produce el fenómeno de cancelación armónica, por lo tanto, la única manera de reducir el espectro armónico, el cual inyecta en la red, es a base de colocar filtros entre bus y tierra. Por otro lado, de un modo parecido que para los convertidores HVDC, para el estudio en frecuencia fundamental se les considera como una carga de potencia reactiva conectada a un bus PQ y, para armónicos superiores al fundamental, se representa mediante una fuente de corriente independiente (figura 5.11) cuyos valores de corriente se obtienen tal como se especificará más adelante.

Tras conocer a grosso modo como son las dos cargas no lineales que existirán en la red, a continuación, se presentan las ecuaciones que modelizan las fuentes de corriente independientes en las cuales se convierten dichas cargas no lineales para $h > 1$. Entonces, para hallar los valores del vector de corriente armónica inyectada, en cada bus y para cada armónico, por las cargas no lineales conectadas al mismo, se deben usar las ecuaciones 5.26, 5.27 y 5.28. En dichas ecuaciones, P_i y Q_i equivalen a las potencias inyectadas en el bus a frecuencia fundamental, \underline{V}_1 al fasor de tensión hallado del flujo de cargas fundamental modificado y los parámetros de I_{espectro}^h y $\varphi_{I_{\text{espectro}}}^h$ vienen definidos en tablas como los espectros característicos de cada tipo de carga. A modo de conclusión para un posterior análisis, tal como se mostrará en los resultados, la inyección de corriente por parte de los SVC es substancialmente menor que la de los convertidores HVDC, por lo tanto, conllevará, en comparación, a un significativo menor impacto de ese tipo de carga no lineal al conjunto de distorsión armónica presente en la red.

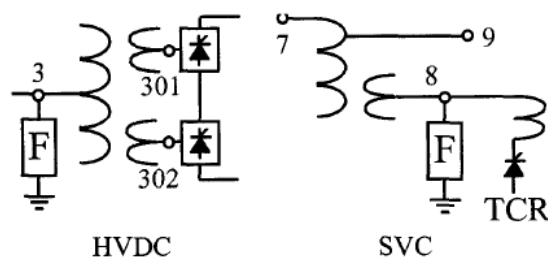


Figura 5.6. "Harmonic sources (Convertidor HVDC y SVC)". [15]

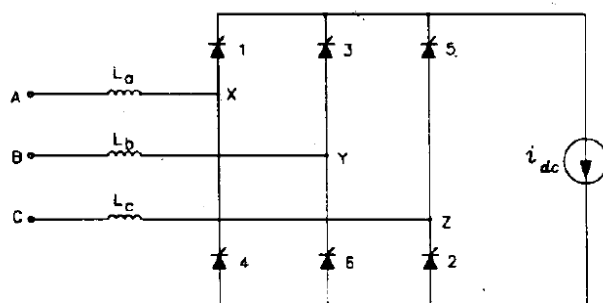


Figura 5.7. "Configuration of a six-pulse bridge converter". [19]

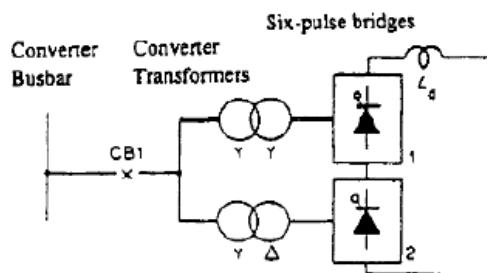


Figura 5.8. Configuración del convertidor HVDC de 12 pulsos. [20]

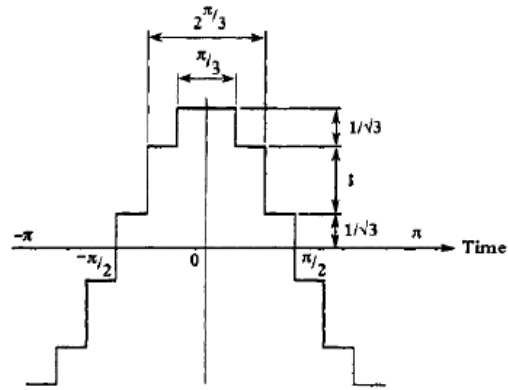


Figura 5.9. Representación en el dominio del tiempo de la corriente de fase de 12 pulsos. [20]

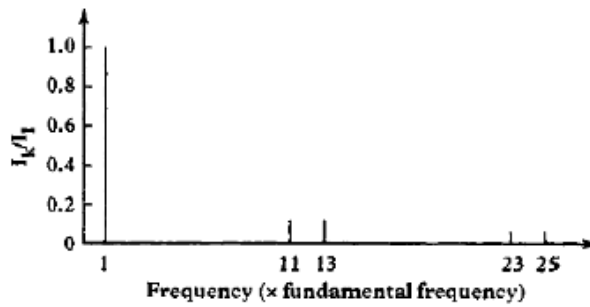


Figura 5.10. Representación en el dominio de la frecuencia de la operación de 12 pulsos. [20]

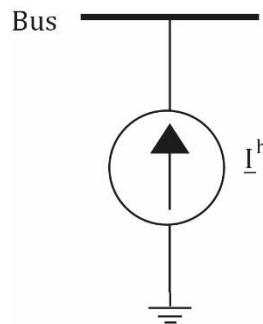


Figura 5.11. Esquema de la fuente de corriente equivalente de las cargas no lineales para $h > 1$.

$$I^1 \angle \varphi_{I^1} = \underline{I}^1 = \left(\frac{P_i + jQ_i}{\underline{V}^1} \right)^* \quad (\text{Eq. 5.26})$$

$$I^h = I^1 \cdot \frac{I_{\text{espectro}}^h}{I_{\text{espectro}}^1} \quad (\text{Eq. 5.27})$$

$$\varphi_{I^h} = \varphi_{I_{\text{espectro}}^h} + h \cdot (\varphi_{I^1} - \varphi_{I_{\text{espectro}}^1}) \quad (\text{Eq. 5.28})$$

Tabla 5.2. Modificación ángulo de corriente espectro cuando el convertidor de seis pulsos se encuentra conectado a un transformador con configuración Yd (estrella-triángulo).

h-order	$\varphi_{\text{espectro}}^h$
5	$\varphi_{\text{espectro}}^{15} + 180^\circ$
7	$\varphi_{\text{espectro}}^{17} - 180^\circ$
17	$\varphi_{\text{espectro}}^{19} - 180^\circ$
19	$\varphi_{\text{espectro}}^{29} - 180^\circ$
29	$\varphi_{\text{espectro}}^{29} - 180^\circ$

5.3. Formulación teórica del flujo armónico de cargas

Existen distintos tipos de métodos resolutivos del flujo armónico de cargas (HLF), los cuales tienen unas u otras consideraciones, hecho que facilitará o complicará el procedimiento de resolución. Todo y eso, cuanto mayor sea la complejidad aparente, significará que dicha resolución será más completa, por su mayor número de restricciones e hipótesis realísticas estipuladas, asimismo y de manera lógica, cuanto más escrupuloso y detallado sea el estudio implicará unos resultados más precisos. En el artículo [21] se exponen los distintos métodos que existen.

En este proyecto se trabajará y, por lo tanto, explicará detalladamente, el denominado método de la penetración de armónicos (HP), “*Harmonic Penetration*” en literatura anglosajona. Este método se define tal como explicita [14]: “herramienta matemática que formula y resuelve el análisis de armónicos en la red lineal cuando son conocidas las intensidades armónicas producidas por las cargas no lineales”. A este método se le estipula como el más sencillo de todos, ya que considera que el comportamiento de las cargas no lineales depende únicamente del nivel de tensión fundamental en los buses y de sus propias variables de estado [21]. Por lo tanto, a continuación, se explicará paso a paso como se debe plantear, resolver e interpretar la formulación de la HP de cara al estudio de las distorsiones originadas en la red a consecuencia de la conexión de cargas no lineales.

Por último, sobre la formulación escogida (HP) cabe decir que, al tratarse del tipo de resolución más sencilla, por el hecho de que se supone que las corrientes fundamental y armónicas no dependen de las tensiones armónicas (hipótesis falsa), esto conllevará a unos resultados más inexactos con respecto a las otras formulaciones. A pesar de ello, tal como se especifica en [21], dicha variación o error de los resultados se caracteriza por ser una sobrestimación de la distorsión armónica de la red, es decir, se obtendrán una serie de resultados los cuales serán más pesimistas que los reales, ya que los valores obtenidos serán mayores de los que realmente habría. No obstante, esto no se toma como un aspecto negativo, ya que si, por ejemplo, tras realizar un estudio, éste te da unas garantías peores que las que realmente tendrás en la realidad, esto supondrá que el diseño teórico implementado a la práctica se hará de un modo más conservador

y, por lo tanto, más seguro y con unas mejores garantías en cuanto a su correcto funcionamiento, que no si se hacen todos los cálculos de un modo más exacto donde apenas se respetara una cierta tolerancia.

5.3.1. Penetración de armónicos (HP)

Para empezar, en la figura 5.12, se ilustra mediante un diagrama de bloques el procedimiento estipulado y descrito para la correspondiente resolución de la HP, dónde se puede observar que existe una división en dos bloques principales. Por un lado, el estudio del flujo de cargas fundamental modificado (FLFm) y, seguidamente, el método de las tensiones de nudo (VN). Además, a modo de síntesis, en la tabla 5.3, se exponen todas las variables, las cuales pueden ser dato o incógnita, que presenta cada una de las dos fases del proceso. Cabe decir que, en este tipo de estudio, aparece un nuevo tipo de bus, se le nombra bus no lineal (NL) debido a que es en este dónde se conectan las cargas no lineales del sistema.

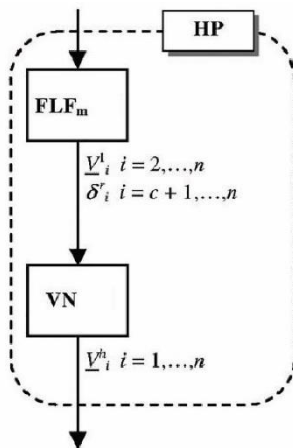


Figura 5.12. "HLF formulation flowcharts for HP". [21]

Tabla 5.3. Tabla de variables para cada tipo de bus en la resolución mediante la HP.

Formulación del HLF	Etapa/Fase	Tipo de bus	Variables	
			Datos	Incógnitas
HP	FLFm	Slack	\underline{V}_1^1	--
		PQ	P_i, Q_i	\underline{V}_i^1
		NL	D_i^m	$\underline{V}_i^1, \delta_i^r$
	VN	Slack	X_1^1	\underline{V}_1^h
		PQ	$\underline{Y}_i^h = f_{Y_i}^h(V_i^1)$	\underline{V}_i^h
		NL	\underline{I}_i^h	\underline{V}_i^h

Tal como se ha dicho, la HP se divide en dos partes independientes pero relacionadas, ya que la etapa VN depende de los resultados obtenidos en un comienzo por el FLFm. De modo que, a

continuación, se detallará el procedimiento de resolución completo del HLF mediante la HP, dónde el primer paso se encuentra en realizar el FLFm, seguidamente, el VN y, para finalizar, cuantificar el valor de la THD existente.

A. Flujo de cargas fundamental modificado (FLFm)

Tal como su nombre indica, el primer paso a realizar es un flujo de cargas fundamental, el cual se encuentra levemente modificado. Se le califica como modificado, ya que en este se empiezan a considerar los modelos armónicos de los elementos conectados al sistema junto con las cargas no lineales, hecho que para el flujo de cargas fundamental no ocurría, al ser todo cargas lineales. Por lo tanto, para este paso, se debe resolver el FLF tal como se detalla en el apartado 4, pero modificando únicamente el hecho de cómo se considerarán a los elementos del SEP y cuáles serán los modelos que los mismos tomarán. Es decir, en el momento de dimensionar y obtener la matriz Y_{BUS} se deberá utilizar para ello, los modelos armónicos descritos en el apartado 5.2 a frecuencia fundamental, por lo tanto, para $h=1$.

Del correspondiente FLFm se obtendrán para cada bus los valores de tensión (módulo y ángulo) como las correspondientes potencias activa y reactiva inyectadas.

B. Método de las tensiones de nudo (VN)

En este segundo bloque, se emplea el método de las tensiones de bus, el cual está caracterizado por no necesitar ningún tipo de método iterativo a diferencia del FLF, sino que consiste en resolver principalmente un sistema de ecuaciones lineal. Este procedimiento de resolución se encuentra dividido en tres sub-etapas diferenciadas. Además, esta técnica se debe realizar en su totalidad para todos los armónicos característicos especificados en el apartado 5.1.4, por lo tanto, consecuentemente de este segundo paso del proceso se obtendrán 9 (sin contar a $h=1$, resultado del FLFm) matrices de tensiones armónicas de bus.

i. Matriz de admitancias de bus (Y_{BUS}^h)

El primer paso consiste en dar forma a la matriz de admitancias de bus a partir de los modelos descritos en el apartado 5.2 y el método de las matrices de incidencia (apartado 3.2), todos ellos para sus respectivos armónicos $h>1$. Por lo tanto, se obtendrán “n” matrices de admitancias de bus, además de la hallada en el FLFm, entonces, para este estudio se tendrán “ $n=9+1$ ” Y_{BUS} .

ii. Matriz de corrientes armónicas inyectadas de bus (I_{BUS}^h)

El segundo punto a llevar a cabo es crear la matriz de corrientes inyectadas en los armónicos múltiplos de la frecuencia fundamental, por lo tanto, tal como se ha podido comprender del apartado 5.2, los únicos buses que se comportarán como una fuente inyectora de corriente para $h>1$ serán los buses en los cuales se encuentren los convertidores HVDC o los SVC, teniendo,

consecuentemente, en el resto de buses una corriente inyectada nula a frecuencia no fundamental ($h \neq 1$).

iii. Matriz de las tensiones armónicas de bus

Por último, para poder finalmente obtener el valor de las tensiones armónicas en cada bus a una frecuencia determinada, correspondiente a un armónico característico, se debe llevar a cabo la resolución del siguiente sistema de ecuaciones lineal formado por tres matrices. Dicho sistema lineal se expresa a partir de las siguientes ecuaciones:

$$Y_{BUS}^h \cdot V_{BUS}^h = I_{BUS}^h \quad (\text{Eq. 5.29})$$

$$V_{BUS}^h = (Y_{BUS}^h)^{-1} \cdot I_{BUS}^h \quad (\text{Eq. 5.30})$$

Entonces, tal como se observa, dicho sistema de ecuaciones matricial da como resultado cada una de las tensiones armónicas de bus.

C. Cálculo de la distorsión armónica total

Finalmente, con tal de cuantificar y medir el nivel de distorsión armónica en la red estudiada, se debe realizar el correspondiente cálculo de la THD, del modo en el que se explicó en el apartado 5.1.2 y vuelve a mostrarse en la ecuación 5.31. Dónde el valor de V^1 corresponde a la tensión a frecuencia 50 Hz, obtenido en el FLFm, y el parámetro V^h pertenece a los valores de tensión armónicas de $h = [5, 7, 11, 13, 17, 19, 23, 25, 29]$ obtenidos a partir del método de VN. Tal como indica la ecuación, el cálculo de la distorsión armónica total se debe realizar para todo bus "i", presentándose dichos resultados de manera porcentual en cada bus.

$$THD_i = \left(\frac{1}{V_i^1} \cdot \sqrt{\sum_{h=2}^{29} (V_i^h)^2} \right) \cdot 100 (\%); \quad \forall i \quad (\text{Eq. 5.31})$$

5.4. Programación con *Matlab* de la automatización completa del HLF con el método de la HP

Del mismo modo que se hizo para el método de las matrices de incidencia y para la resolución completa del flujo de cargas fundamental con GS y NR, se ha llevado a cabo un código en *Matlab* tal que permita calcular de una manera más ágil y completa el estudio del flujo armónico de cargas mediante el método de la penetración de armónicos a partir de la red IEEE 14-buses modificada expuesta en el apartado 5.5.1.

En este estudio particular se han creado dos programas independientes, tal que permitan diferenciar claramente los dos bloques del método de la penetración de armónicos (HP), aunque ambos se encuentren internamente relacionados por la necesidad de obtener datos de uno a otro. Por lo tanto, en el Anexo C se encuentran los dos códigos de los archivos de *Matlab*, dónde el primero corresponde al FLFm y el segundo al método de las tensiones de nudo (VN).

El programa correspondiente al FLFm está basado cuasi en su totalidad por el mismo código implementado para el FLF de NR (siendo NR por el hecho que se explicará en el apartado 5.5), dónde principalmente se han modificado ciertos parámetros del cálculo de la Y_{BUS} para ajustar los nuevos tipos de carga del sistema. Además, la entrada de datos de las líneas se ha modificado ya que no se consideran las admitancias shunt de los buses como datos de entrada, por el hecho que este nuevo código las calcula por sí solo, no requiriéndose entonces su valor explícito. Para terminar, el programa se ejecuta y este extrae un archivo “.xlsx” el cual presenta la misma presentación de resultados que el obtenido en el FLF_NR.

El segundo programa, perteneciente al método de las VN, lleva a cabo los pasos teóricos descritos en el punto B del apartado 5.3.1. Tras llevar a cabo dichos procedimientos de cálculo para cada uno de los armónicos característicos del sistema, extrae todos los valores del módulo de tensión de cada bus y cada armónico. Todo ello lo vuelca de manera ordenada y clara en un archivo “.xlsx”, para que posteriormente, dentro de la misma hoja de cálculo, se puedan interpretar los valores obtenidos y calcular allí mismo las estimaciones de la distorsión armónica total, entre otros cálculos.

Para concluir, tras ejecutar ambos programas, se generarán sus correspondientes archivos Excel de los cuales se podrá coger, desarrollar y analizar los valores resultado obtenidos del correspondiente estudio del HLF.

5.5. Resultados del estudio del flujo armónico de cargas a partir del método de la HP en la red IEEE 14-buses

En este apartado, en primer lugar, se expondrán y detallarán todos los componentes, junto con su distribución, de la red IEEE 14-buses modificada. Posteriormente, se presentarán y analizarán los resultados obtenidos del estudio del flujo armónico de cargas con el método de la penetración armónica en dicha red.

Por otro lado, en el apartado 4.5.4 se llegó a la conclusión que el método numérico de Newton-Raphson garantizaba unas cuantificadas mejores prestaciones en comparación con Gauss-Seidel a la hora de resolver el FLF. Es por ello, que en este apartado correspondiente a la resolución del HLF, mediante la HP, se va a utilizar para la etapa del FLFm únicamente el método de NR.

5.5.1. Red IEEE 14-buses modificada

Tal como ya se ha dicho, la red IEEE 14-buses, la cual ha sido modificada para ser tratada en el correspondiente estudio del flujo armónico de cargas, ha sido extraída del estudio correspondiente a la referencia [15]. Cabe decir que se parte del mismo “paper” como base de referencia y comparativa para el estudio armónico de este proyecto.

Los cambios en base a la red IEEE 14-buses estándar (expuesta en el apartado 3.1.2) se encuentran principalmente en la incorporación de dos tipos de cargas no lineales en el sistema, el convertidor HVDC y el SVC, las cuales se encuentran conectadas en los buses 3 y 8, respectivamente. Por un lado, el modelo de carga no lineal del convertidor HVDC está conectado al bus 3, pero a este se le modeliza a partir de dos cargas conectadas tras dos transformadores al mencionado bus, por lo tanto, seguidamente del bus 3 se crean dos nuevos buses, el 301 y el 302. Por otro lado, la carga conocida como SVC se incorpora en el bus 8, dónde no se debe llevar a cabo ninguna modificación más. Es por ello, que por lo que respecta a las modificaciones incorporadas a la red IEEE 14-buses, se puede observar que la misma ha sido modificada para una correcta adecuación e incorporación de las cargas no lineales, llevando a cabo finalmente que la red posea 16 buses en total, donde estos dos nuevos buses (301 y 302) se entienden como una extensión del bus 3 para garantizar una correcta conexión del convertidor HVDC.

A continuación, en primer lugar, se muestra en la figura 5.13 el esquema unifilar equivalente a la red IEEE 14-buses modificada. Posteriormente, en las tablas 5.4 y 5.5, se exponen los datos de las líneas y los buses de esta nueva red. Por último, en la tabla 5.6, se tabulan los valores de las corrientes espectro, los cuales se utilizarán para cuantificar el valor en módulo y ángulo de las corrientes armónicas producidas por las cargas no lineales a frecuencia mayor que la fundamental. Todos los datos de la red se encuentran en [15].

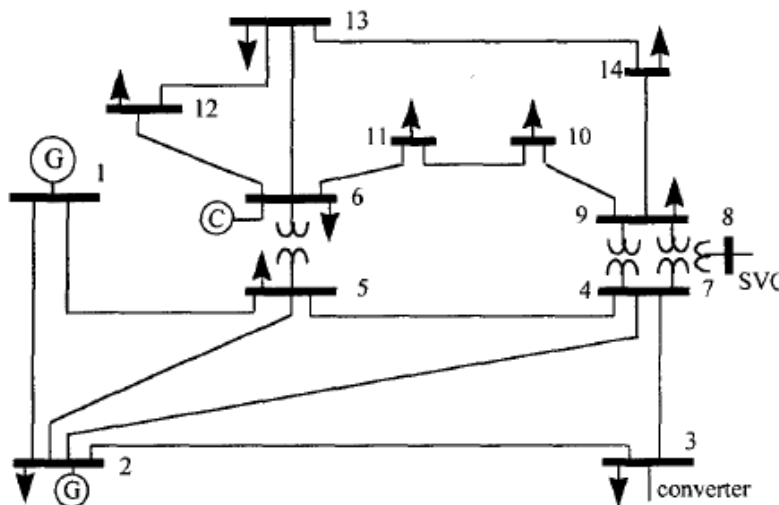


Figura 5.13. Representación esquemática de la red IEEE 14-buses modificada. [15]

Tabla 5.4. "Modified IEEE 14-Bus Test System Circuit Data".

Rama no.	Desde el Bus	Al Bus	Resistencia	Reactancia	Susceptancia	Transformador TAP
			R	X	B	a
			p.u.	p.u.	p.u.	p.u.
1	1	2	0,01937	0,05916	0,05279	0
2	1	5	0,05402	0,223	0,0492	0
3	2	3	0,04697	0,19794	0,0438	0
4	2	4	0,0581	0,17628	0,0374	0
5	2	5	0,05693	0,17384	0,03386	0
6	3	4	0,067	0,17099	0,0346	0
7	4	5	0,01335	0,04209	0,0128	0
8	4	7	0	0,209	0	1
9	4	9	0	0,55618	0	1
10	5	6	0	0,2502	0	1
11	6	11	0,09495	0,19887	0	0
12	6	12	0,12285	0,25575	0	0
13	6	13	0,06613	0,13024	0	0
14	7	8	0	0,17615	0	1
15	7	9	0	0,11	0	1
16	9	10	0,03181	0,08448	0	0
17	9	14	0,0127	0,27033	0	0
18	10	11	0,08203	0,19202	0	0
19	12	13	0,22087	0,19985	0	0
20	13	14	0,17089	0,34795	0	0
21	3	301	0	0,028	0	1
22	3	302	0	0,028	0	1
23	9	0	0	0	0,0633	0
24	8	0	0,5251	8,31233	0,03015	0
25	8	0	0,5251	1,32635	0,03015	0
26	8	0	0,5251	0,67307	0,03015	0
27	8	0	0,5251	0,27515	0,03015	0
28	3	0	0,00136	0,02772	0,24916	0
29	3	0	0,00136	0,02772	0,24916	0
<i>Datos generadores para $h > 1...$ (reactancias sub-transitorias)</i>						
30	1	0	0	0,25	0	0
31	2	0	0	0,25	0	0

32	6	0	0	0,25	0	0
<i>Datos cargas lineales para h>1... (Todos los valores a determinar según apartado 5.2.4)</i>						
33	3	0	0	0	0	0
34	4	0	0	0	0	0
35	5	0	0	0	0	0
36	7	0	0	0	0	0
37	9	0	0	0	0	0
38	10	0	0	0	0	0
39	11	0	0	0	0	0
40	12	0	0	0	0	0
41	13	0	0	0	0	0
42	14	0	0	0	0	0

Tabla 5.5. "Modified IEEE 14-Bus Test System Bus Data without generator Q limits".

Bus no.	Tipo de bus	Tensión de bus		Generación de potencia		Demanda de potencia		Límites de Q generación	
		V	δ	P _{Gi}	Q _{Gi}	P _{Li}	Q _{Li}	Q _{min}	Q _{max}
		p.u.	deg.	MW	Mvar	MW	Mvar	Mvar	Mvar
1	1	1,06	0	261,681	-28,633	0	0	0	0
2	2	1,045	0	18,3	5,857	0	0	-500	500
3	3	1	0	0	0	0	0	0	0
301	3	1	0	0	0	59,505	3,363	0	0
302	3	1	0	0	0	59,505	3,363	0	0
4	3	1	0	0	0	47,79	-3,9	0	0
5	3	1	0	0	0	7,599	1,599	0	0
6	2	1,07	0	-11,2	44,2	0	0	-500	500
7	3	1	0	0	0	0	0	0	0
8	3	1	0	0	0	0	12,9	0	0
9	3	1	0	0	0	29,499	16,599	0	0
10	3	1	0	0	0	9	5,799	0	0
11	3	1	0	0	0	3,501	1,8	0	0
12	3	1	0	0	0	6,099	1,599	0	0
13	3	1	0	0	0	13,5	5,799	0	0
14	3	1	0	0	0	14,901	5,001	0	0

Tabla 5.6. "Modified IEEE 14-buses Harmonic Source Data"

H-order	Six-Pulse HVDC		Delta Connected TCR	
	$I_{espectro}^h$	$\varphi_{I_{espectro}^h}$	$I_{espectro}^h$	$\varphi_{I_{espectro}^h}$
	p.u.	deg.	p.u.	deg.
1	1,0000	-49,56	1,0000	46,92
5	0,1941	-67,77	0,0702	-124,40
7	0,1309	11,90	0,0250	-29,87
11	0,0758	-7,13	0,0136	-23,75
13	0,0586	68,57	0,0075	71,50
17	0,0379	46,53	0,0062	77,12
19	0,0329	116,46	0,0032	173,43
23	0,0226	87,47	0,0043	178,02
25	0,0241	159,32	0,0013	-83,45
29	0,0193	126,79	0,0040	-80,45

5.5.2. Resultados de la HP en la red IEEE 14-buses modificada

En este apartado se exponen y analizan los distintos resultados obtenidos del correspondiente estudio del flujo armónico de cargas de la red IEEE 14-buses modificada a partir del método de la penetración de armónicos.

En las figuras 5.14, 5.15 y 5.16 se muestran los datos de entrada, colocados en hojas de cálculo, para los códigos programados en *Matlab*.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1	DATOS BUSES n14 (Sin Q límites)									
2										
3	<i>nbus</i>	<i>V</i>	<i>delta</i>	<i>PG</i>	<i>QG</i>	<i>PD</i>	<i>QD</i>	<i>Qmin</i>	<i>Qmax</i>	<i>Tipo</i>
4	1	1,06	0	261,681	-28,633	0	0	0	0	1
5	2	1,045	0	18,3	5,857	0	0	-500	500	2
6	3	1	0	0	0	0	0	0	0	3
7	4	1	0	0	0	47,79	-3,9	0	0	3
8	5	1	0	0	0	7,599	1,599	0	0	3
9	6	1,07	0	-11,2	44,2	0	0	-500	500	2
10	7	1	0	0	0	0	0	0	0	3
11	8	1	0	0	0	0	12,9	0	0	3
12	9	1	0	0	0	29,499	16,599	0	0	3
13	10	1	0	0	0	9	5,799	0	0	3
14	11	1	0	0	0	3,501	1,8	0	0	3
15	12	1	0	0	0	6,099	1,599	0	0	3
16	13	1	0	0	0	13,5	5,799	0	0	3
17	14	1	0	0	0	14,901	5,001	0	0	3
18	15	1	0	0	0	59,505	3,363	0	0	3
19	16	1	0	0	0	59,505	3,363	0	0	3
20	Base MVA = 100									
21										
22	** Para la programación se toma el bus 301 con el n°15 y el bus 302 con el n°16.									

Figura 5.14. Datos de entrada de los buses de la red IEEE 14-buses modificada sin límites de Q.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
1	DATOS LÍNEAS n14m (Branch y Bus)												
2													
3	<i>Branch no.</i>	<i>From Bus</i>	<i>To Bus</i>	<i>R</i>	<i>X</i>	<i>B/2 - B</i>	<i>a</i>						
4	1	1	2	0,01937	0,05916	0,0264	0						
5	2	1	5	0,05402	0,223	0,0246	0						
6	3	2	3	0,04697	0,19794	0,0219	0						
7	4	2	4	0,0581	0,17628	0,0187	0						
8	5	2	5	0,05693	0,17384	0,01693	0						
9	6	3	4	0,067	0,17099	0,0173	0						
10	7	4	5	0,01335	0,04209	0,0064	0						
11	8	4	7	0	0,209	0	1						
12	9	4	9	0	0,55618	0	1						
13	10	5	6	0	0,2502	0	1						** Líneas de transporte y transformadores.
14	11	6	11	0,09495	0,19887	0	0						
15	12	6	12	0,12285	0,25575	0	0						** Para la programación se toma el bus 301 con el nº15 y el bus 302 con el nº16.
16	13	6	13	0,06613	0,13024	0	0						
17	14	7	8	0	0,17615	0	1						
18	15	7	9	0	0,11	0	1						
19	16	9	10	0,03181	0,08448	0	0						
20	17	9	14	0,0127	0,27033	0	0						
21	18	10	11	0,08203	0,19202	0	0						
22	19	12	13	0,22087	0,19985	0	0						
23	20	13	14	0,17089	0,34795	0	0						
24	21	3	15	0	0,028	0	1						
25	22	3	16	0	0,028	0	1						
26	23	9	0	0	0	0,0633	0						
27	24	8	0	0,5251	8,31233	0,03015	0						
28	25	8	0	0,5251	1,32635	0,03015	0						
29	26	8	0	0,5251	0,67307	0,03015	0						** Admitancias shunt de condensadores y filtros.
30	27	8	0	0,5251	0,27515	0,03015	0						
31	28	3	0	0,00136	0,02772	0,24916	0						
32	29	3	0	0,00136	0,02772	0,24916	0						
33	30	1	0	0	0,25	0	0						** Admitancias shunt generadores h>1.
34	31	2	0	0	0,25	0	0						
35	32	6	0	0	0,25	0	0						
36	33	3	0	0	0	0	0						
37	34	4	0	0	0	0	0						
38	35	5	0	0	0	0	0						
39	36	7	0	0	0	0	0						
40	37	9	0	0	0	0	0						** Admitancias shunt cargas h>1, sus valores se calculan en Matlab, aquí se preconsideran.
41	38	10	0	0	0	0	0						
42	39	11	0	0	0	0	0						
43	40	12	0	0	0	0	0						
44	41	13	0	0	0	0	0						
45	42	14	0	0	0	0	0						

Figura 5.15. Datos de entrada de las líneas, filtros, condensadores, generadores y cargas de la red IEEE 14-buses modificada.

	A	B	C	D	E
1	DATOS HARMONIC SOURCE n14m				
2					
3	<i>H-order</i>	<i>Six-Pulse HVDC</i>		<i>Delta Connected TCR</i>	
4		<i>Mag (p.u)</i>	<i>Angle (deg)</i>	<i>Mag (p.u)</i>	<i>Angle (deg)</i>
5	1	1,0000	-49,56	1,0000	46,92
6	5	0,1941	-67,77	0,0702	-124,40
7	7	0,1309	11,90	0,0250	-29,87
8	11	0,0758	-7,13	0,0136	-23,75
9	13	0,0586	68,57	0,0075	71,50
10	17	0,0379	46,53	0,0062	77,12
11	19	0,0329	116,46	0,0032	173,43
12	23	0,0226	87,47	0,0043	178,02
13	25	0,0241	159,32	0,0013	-83,45
14	29	0,0193	126,79	0,0040	-80,45

Figura 5.16. Datos de entrada de los espectros armónicos de corriente de las cargas HVDC y SVC.

Para empezar con el análisis de los resultados obtenidos del HLF, en primer lugar, se tabulan los resultados del correspondiente estudio del flujo de cargas fundamental modificado obtenidos a partir del método iterativo de Newton-Raphson.

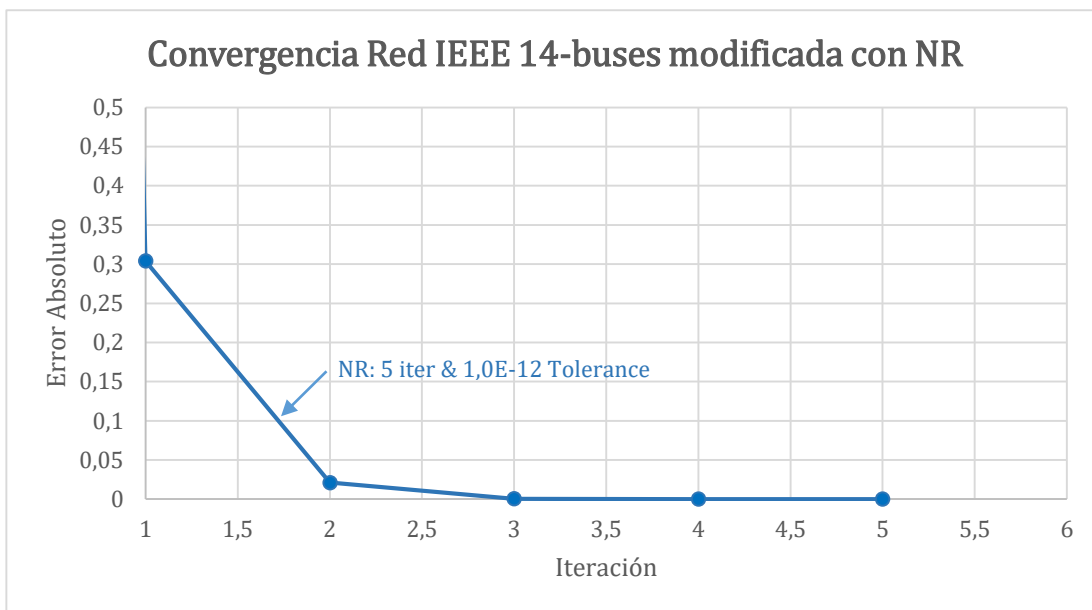
Tabla 5.7. Resultados del flujo de cargas fundamental modificado de la red IEEE 14-buses modificada con NR.

FLFm con Newton-Raphson				
Bus no.	SIN límites de generación de Q			
	V (p.u)	δ (deg.)	P _i (p.u)	Q _i (p.u)
1	1,0600	0,0000	2,6168	-0,2853
2	1,0450	-5,6805	0,1830	0,0576
3	1,0427	-15,3014	0,0000	0,0000
301	1,0417	-16,1803	-0,5951	-0,0336
302	1,0417	-16,1803	-0,5951	-0,0336
4	1,0282	-11,4091	-0,4779	0,0390
5	1,0337	-9,8156	-0,0760	-0,0160
6	1,0700	-15,8736	-0,1120	0,4420
7	1,0193	-14,4696	0,0000	0,0000
8	1,0209	-14,4934	0,0000	-0,1290
9	1,0147	-16,0863	-0,2950	-0,1660
10	1,0168	-16,3293	-0,0900	-0,0580
11	1,0394	-16,2103	-0,0350	-0,0180
12	1,0528	-16,7154	-0,0610	-0,0160
13	1,0458	-16,7304	-0,1350	-0,0580
14	1,0154	-17,3840	-0,1490	-0,0500
	Total de iteraciones = 5			
	Tolerancia = 1,0E-12			

Todos los valores obtenidos se consideran como correctos, ya que, por un lado, cumplen con la normativa (tabla 4 del punto 8.2.6 del BOE-A-2018-2198 [12][13]) y, en segundo lugar, todos ellos coinciden exactamente con los valores del estudio [15] presentes en su tabla 1.1, los cuales se han tomado como referencia al partir ambos estudios de los mismos datos de entrada. Por lo tanto, el primer paso de la HP ha dado unos resultados satisfactorios.

Analizando la convergencia del método numérico utilizado (NR), cabe decir que tal como se esperaba, este método ha presentado una convergencia rápida (sólo 5 iteraciones) y sin presentar ninguna anomalía o error en ella. Entonces, se puede afirmar que el motivo por el cual en este caso solo se usaba a Newton-Raphson, ha sido la respuesta que se ha obtenido de este, es decir, se vuelve a ratificar que posee una buena convergencia, tanto en rapidez como en eficacia. Además,

del mismo modo que en los resultados del apartado 4 para los correspondientes FLF, se ha llevado cabo una gráfica (gráfica 5.1) de convergencia del error para el método y red utilizado.



Gráfica 5.1. Convergencia del error de NR en la red IEEE 14-buses modificada.

En segundo lugar, y tras llevar a cabo el método de las tensiones de nudo (VN) del proceso de la penetración de armónicos, se obtienen los resultados expuestos a continuación.

En la tabla 5.8, aparecen los módulos de las tensiones armónicas para todos los armónicos característicos, junto con el valor de la distorsión armónica total (THD) presente en cada bus de la red. En esta tabla y en las gráficas 5.2 y 5.3, se exponen de manera complementaria la magnitud que presenta cada armónico de tensión, con tal de poder visualizar cuanto influyen y con qué grado lo hacen. Asimismo, también permite ver que armónicos característicos son los más notables del conjunto, por si en algún caso se quisiera reducir en cierta medida la influencia de estos, saber en cuales actuar en primera instancia.

Tabla 5.8. Resultados del método de las tensiones de nudo y de la THD de la red IEEE 14-buses modificada.

Método de VN											
Bus no.	V _h (pu)										THD (%)
	h-order										
	1	5	7	11	13	15	17	19	23	25	
1	1,0600	1,53E-04	1,71E-04	5,70E-03	1,70E-03	6,75E-05	1,36E-05	8,14E-04	2,86E-03	1,31E-05	0,63%
2	1,0450	1,21E-04	1,64E-04	5,21E-03	1,40E-03	5,19E-05	9,42E-06	1,06E-03	1,99E-03	2,61E-06	0,56%
3	1,0427	6,00E-04	8,66E-05	2,69E-03	1,70E-03	1,85E-07	3,57E-07	6,57E-03	8,63E-03	8,30E-07	1,09%

301	1,0417	1,50E-02	1,46E-02	1,07E-02	1,39E-02	1,03E-02	1,00E-02	1,49E-02	1,83E-02	8,97E-03	3,83%
302	1,0417	1,61E-02	1,48E-02	1,07E-02	1,39E-02	1,03E-02	1,00E-02	1,49E-02	1,83E-02	8,97E-03	3,87%
4	1,0282	4,36E-04	2,73E-04	4,01E-03	7,58E-04	4,55E-05	1,45E-05	2,32E-03	1,08E-03	7,27E-06	0,47%
5	1,0337	3,70E-04	2,54E-04	4,86E-03	1,13E-03	3,56E-05	1,46E-05	3,98E-03	3,43E-03	6,08E-05	0,70%
6	1,0700	4,87E-04	2,31E-04	2,30E-03	5,32E-04	1,12E-04	4,06E-05	1,03E-03	9,68E-04	3,70E-05	0,26%
7	1,0193	2,00E-03	7,66E-04	2,94E-03	1,05E-03	1,38E-04	9,79E-05	5,14E-04	2,04E-04	3,49E-04	0,38%
8	1,0209	4,37E-03	1,53E-03	9,26E-04	9,18E-04	9,46E-04	6,00E-04	1,18E-03	3,97E-04	1,34E-03	0,52%
9	1,0147	1,38E-03	5,86E-04	3,87E-03	1,50E-03	4,64E-04	1,75E-04	8,14E-04	3,10E-04	9,24E-05	0,45%
10	1,0168	1,18E-03	5,00E-04	3,36E-03	1,23E-03	3,71E-04	1,39E-04	4,67E-04	1,03E-04	7,49E-05	0,38%
11	1,0394	8,26E-04	3,61E-04	2,74E-03	8,34E-04	2,35E-04	8,74E-05	3,00E-04	4,22E-04	5,38E-05	0,29%
12	1,0528	5,20E-04	2,36E-04	2,13E-03	5,04E-04	1,14E-04	4,14E-05	7,74E-04	7,44E-04	3,32E-05	0,24%
13	1,0458	5,64E-04	2,52E-04	2,15E-03	5,33E-04	1,28E-04	4,67E-05	6,70E-04	6,66E-04	3,48E-05	0,24%
14	1,0154	9,52E-04	3,98E-04	2,67E-03	9,00E-04	2,58E-04	9,57E-05	1,83E-04	1,14E-04	5,22E-05	0,30%

Analizando los resultados obtenidos de distorsión armónica total (tabla 5.8) y comparándolos con los resultados del estudio [15], se observan ciertas discrepancias en cuanto a los valores numéricos obtenidos en los dos casos. A pesar de ello, el autor del artículo especifica que, en caso de utilizarse un método no iterativo a partir de considerar a las cargas no lineales como fuentes de corriente armónicas (caso de este proyecto), los resultados que se obtengan deben ser parecidos a los suyos. Entonces, contemplándolo desde el punto de vista de que no deben ser iguales, sino que parecidos, se vuelven a analizar y, finalmente, a los mismos se los toma como buenos al presentar similitud, en el orden de influencia, con los obtenidos en el “paper”, pero eso sí, a estos se les considera como aproximados. El caso de no considerarlos como resultados 100% fiables/exactos viene dado porque, tal como ya se ha justificado, los valores que se obtienen del HLF a partir del método de la HP serán siempre superiores a los reales, por lo tanto, no garantizan una exactitud en los mismos, a pesar de ello, lo que sí que se puede afirmar es que éstos proporcionarían el peor escenario posible. Concluyendo, a éstos se les considera como correctos.

Adicionalmente, tal como se esperaba, es en el bus 3, a consecuencia de ser el nexo de los buses 301 y 302, dónde hay mayor distorsión armónica, ya que es en este dónde se encuentra conectada la carga no lineal más distorsionante de las presentes en la red (convertidor HVDC). Además, si se compara con el THD del bus 8 se puede observar que la carga SVC es menos influyente, armónicamente hablando, por la cuestión que se justificó en la introducción teórica de las mismas. En la gráfica 5.3 se puede ver como las tensiones armónicas de uno respecto al otro son superiores.

Asimismo, prosiguiendo con el análisis de los buses con cargas no lineales, se quiere enfatizar en los aspectos teóricos argumentados, ya que se puede justificar como la teoría anteriormente descrita se cumple en el caso práctico.

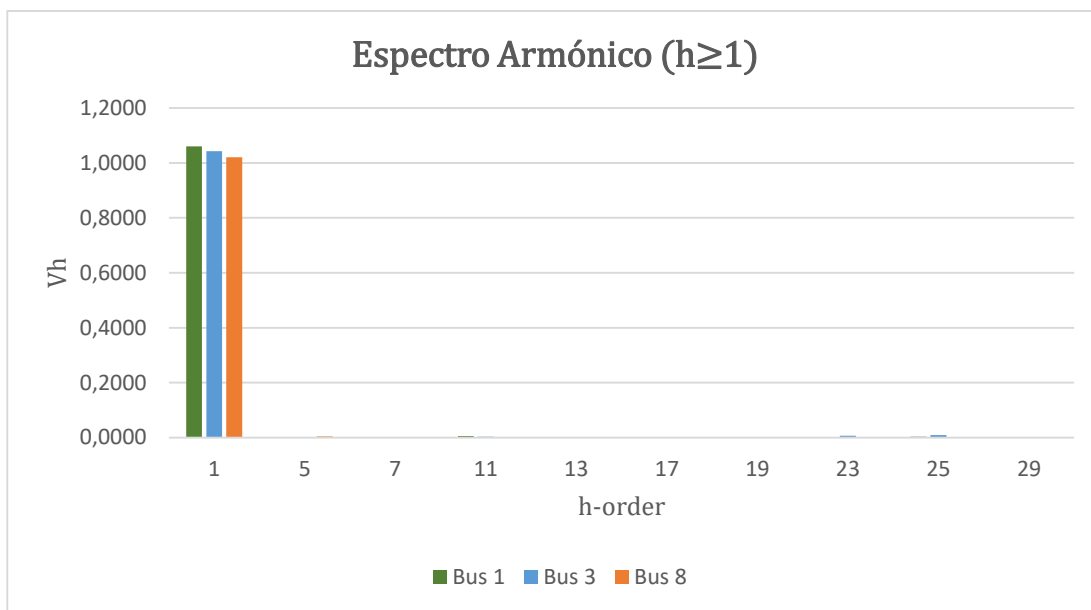
En primer lugar, para el bus 3, se sabe que había existencia del fenómeno de cancelación armónica, esto conllevaba a que únicamente habría los armónicos $h = [1, 11, 13, 23, 25]$. Además, también decir que, en la red IEEE 14-buses modificada, los dos filtros conectados a este bus, denominados "*Filter@3:11th*", se encuentran sintonizados para $h=12$, con la finalidad de mitigar simultáneamente a los armónicos 11 y 13. Por lo tanto, tal como se puede observar en la gráfica 5.3, los únicos armónicos "vivos" en su total magnitud son el 23 y el 25, todo y que el 11 y el 13 no han desaparecido completamente.

Seguidamente, para el bus 8, se conoce que no hay cancelación armónica, por lo tanto, el único método que permite rebajar la influencia de los armónicos es en base a colocar filtros en paralelo entre el mencionado bus y tierra. Entonces, tal como aparece en los datos de la red IEEE 14-buses modificada, hay conectados en el bus 8 cuatro filtros, dónde éstos se encuentran sintonizados a las $h = [2, 5, 7, 11]$, ya que el autor ha querido atenuar las componentes asociadas a esas h 's por ser las que tienen mayor módulo en el espectro. De este modo, quedan como componentes intactas las correspondientes a $h > 11$. A pesar de la modelización de los filtros mencionados para los correspondientes armónicos, se observa que los valores de los armónicos que han sido atenuados, siguen presentando mayor magnitud que el resto, aunque sí que se han reducido en comparación a no haber ningún tipo de filtro.

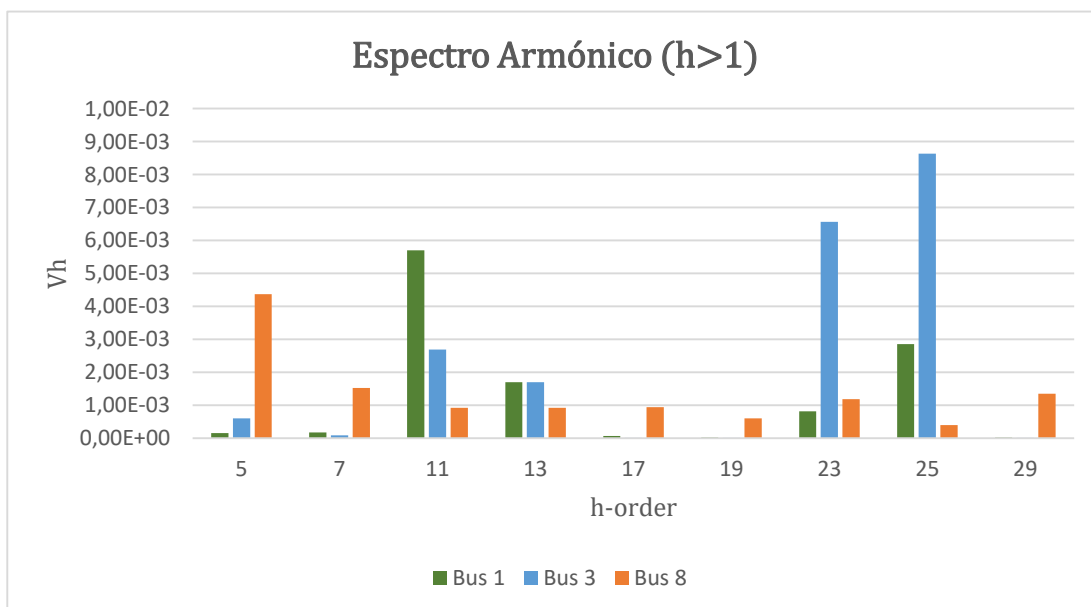
Por otro lado, si se examinan los valores de THD del conjunto de la red, cabe decir que todos los valores se consideran *a priori* aceptables, al estar aproximadamente por el orden de $\leq 1\%$ de magnitud, ya que los buses 301 y 302 (con $\text{THD} > 1\%$) no se entienden específicamente como buses de la red, sino que son elementos internos del propio convertidor HVDC, a pesar de que de un comienzo se tomaran como buses de la misma. Todo y eso, para saber si la distorsión presente en la red es completamente aceptable o no, se ha de llevar a cabo un análisis secundario, el cual se expone y argumenta a partir de la tabla 5.9.

Por último, concretando en las gráficas 5.2 y 5.3, dónde aparecen los espectros armónicos para $h \geq 1$ y $h > 1$. Cabe decir que se han creado partiendo de la base de definir cuáles eran los buses más problemáticos, por poseer cargas no lineales, y, además, se ha adjuntado el bus 1, al ser el de

referencia de la red, para así observar también la influencia armónica espectral en el mismo. Enfatizando en la gráfica 5.2, ya que de la gráfica 5.3 ya se han extraído conclusiones de la misma, decir que el espectro armónico que se presenta para $h > 1$ en comparación a las tensiones fundamentales es considerablemente reducido, por el hecho de que en la misma gráfica únicamente se aprecian los armónicos 23 y 25 del bus 3, los cuales en la gráfica 5.3 son los que tienen mayor magnitud. Por lo tanto, se concluye diciendo que la influencia de éstos no es despreciable, pero tampoco determinante al tener una magnitud baja.



Gráfica 5.2. Espectro armónico de los buses 1, 3 y 8 para $h \geq 1$.



Gráfica 5.3. Espectro armónico de los buses 1, 3 y 8 para $h > 1$.

Con tal de verificar los resultados obtenidos del VN y poder afirmar si realmente éstos cumplen con los límites legislativos, en cuanto a la distorsión armónica presente en cada uno de los buses, a continuación, se desarrolla el correspondiente estudio de comprobación.

Considerando la legislación vigente de este campo, cabe decir que se estipulan unos valores respecto a unas condiciones ideales, los cuales se toman como aceptados por los organismos y, por lo tanto, estos marcarán los límites de perturbación admisibles. Así pues, la referencia [14] expone que la Comisión Electrotécnica Internacional (CEI o IEC, en inglés) ampara una serie de conceptos dentro del campo de la compatibilidad magnética, dónde principalmente para este caso se acoge el término de nivel de compatibilidad, el cual [14] lo define como: “*máximo nivel especificado de perturbación electromagnética al que se puede esperar que sea sometido un dispositivo, aparato o sistema funcionando en condiciones particulares*”, por lo tanto, el nivel de perturbación armónica presente en la red deberá ser inferior al valor estipulado como nivel de compatibilidad.

En la tabla 5.9 se muestran los valores obtenidos de los niveles de perturbación para cada armónico y cada bus. Dicho valor calculado (en %) de perturbación equivale a la tensión de bus armónica entre la tensión de bus a frecuencia fundamental. También, en la última fila, se muestra el nivel de compatibilidad que estipula la norma [14] para cada orden de armónico, el cual se utilizará para comparar los resultados obtenidos con este.

Tabla 5.9. Niveles de compatibilidad de la red IEEE 14-buses modificada.

Niveles de Compatibilidad									
Bus no.	h-order								
	5	7	11	13	15	17	19	23	25
1	0,01%	0,02%	0,54%	0,16%	0,01%	0,00%	0,08%	0,27%	0,00%
2	0,01%	0,02%	0,50%	0,13%	0,00%	0,00%	0,10%	0,19%	0,00%
3	0,06%	0,01%	0,26%	0,16%	0,00%	0,00%	0,63%	0,83%	0,00%
301	1,44%	1,40%	1,02%	1,33%	0,99%	0,96%	1,43%	1,76%	0,86%
302	1,55%	1,42%	1,02%	1,33%	0,99%	0,96%	1,43%	1,76%	0,86%
4	0,04%	0,03%	0,39%	0,07%	0,00%	0,00%	0,23%	0,10%	0,00%
5	0,04%	0,02%	0,47%	0,11%	0,00%	0,00%	0,39%	0,33%	0,01%
6	0,05%	0,02%	0,22%	0,05%	0,01%	0,00%	0,10%	0,09%	0,00%
7	0,20%	0,08%	0,29%	0,10%	0,01%	0,01%	0,05%	0,02%	0,03%
8	0,43%	0,15%	0,09%	0,09%	0,09%	0,06%	0,12%	0,04%	0,13%
9	0,14%	0,06%	0,38%	0,15%	0,05%	0,02%	0,08%	0,03%	0,01%
10	0,12%	0,05%	0,33%	0,12%	0,04%	0,01%	0,05%	0,01%	0,01%
11	0,08%	0,03%	0,26%	0,08%	0,02%	0,01%	0,03%	0,04%	0,01%
12	0,05%	0,02%	0,20%	0,05%	0,01%	0,00%	0,07%	0,07%	0,00%

13	0,05%	0,02%	0,21%	0,05%	0,01%	0,00%	0,06%	0,06%	0,00%
14	0,09%	0,04%	0,26%	0,09%	0,03%	0,01%	0,02%	0,01%	0,01%
Norma	6%	5%	3,5%	3%	2%	1,5%	1,5%	1,5%	1,3%

Comparando todos los valores obtenidos con los de la norma, se observa que únicamente el armónico $h=23$ para los buses 301 y 302 no cumplen con la misma, a pesar de ello, tal como se ha dicho, estos dos buses se consideran parte del convertidor HVDC, por lo tanto, queda dentro del marco de la carga no lineal y, consecuentemente, no se considera como elemento interno de la red. Así pues, si se apartan los resultados de los buses 301 y 302, por lo ya argumentado, se puede afirmar que todos los valores obtenidos son satisfactorios y legislativamente aceptables. En conclusión, esta comprobación ha hecho poder reafirmar a los valores de tensión armónica como correctos.

Tras determinar que todos los resultados obtenidos, en cada apartado del método de la penetración de armónicos del flujo armónico de cargas, son satisfactorios, se resumen en la tabla 5.10 de manera sintetizada.

Tabla 5.10. Resultados finales del HLF de la red IEEE 14-buses modificada con HP.

HLF mediante HP					
Bus nº	$ V $ (p.u)	δ (deg.)	P_i (p.u)	Q_i (p.u)	THD (%)
1	1,0600	0,0000	2,6168	-0,2853	0,63%
2	1,0450	-5,6805	0,1830	0,0576	0,56%
3	1,0427	-15,3014	0,0000	0,0000	1,09%
301	1,0417	-16,1803	-0,5951	-0,0336	3,83%
302	1,0417	-16,1803	-0,5951	-0,0336	3,87%
4	1,0282	-11,4091	-0,4779	0,0390	0,47%
5	1,0337	-9,8156	-0,0760	-0,0160	0,70%
6	1,0700	-15,8736	-0,1120	0,4420	0,26%
7	1,0193	-14,4696	0,0000	0,0000	0,38%
8	1,0209	-14,4934	0,0000	-0,1290	0,52%
9	1,0147	-16,0863	-0,2950	-0,1660	0,45%
10	1,0168	-16,3293	-0,0900	-0,0580	0,38%
11	1,0394	-16,2103	-0,0350	-0,0180	0,29%
12	1,0528	-16,7154	-0,0610	-0,0160	0,24%
13	1,0458	-16,7304	-0,1350	-0,0580	0,24%
14	1,0154	-17,3840	-0,1490	-0,0500	0,30%

6. Análisis del impacto ambiental

En el aspecto referente al impacto ambiental asociado a este proyecto cabe decir que, al ser específicamente un trabajo de investigación, cuya esencia de trabajo es teórica e informática, no se requiere de ninguna herramienta material ni equipos técnicos para su desarrollo. Esto implica la no existencia de vertido de residuos contaminantes de manera directa, pero sí de manera indirecta. Por lo tanto, para empezar, se clasifican a los agentes contaminantes presentes en este trabajo a partir de tres grupos principales:

- *Residuos informáticos.* Todos aquellos materiales que solo se pueden emplear una única vez tras el uso de dicho equipo informático, por ejemplo, la tinta del tóner de una impresora.
- *Material de oficina.* Todos aquellos materiales que se usan como herramienta de escritura, los cuales presentan un proceso de reciclaje más complejo, por ejemplo, bolígrafos, papeles, post-it, etc.
- *Consumo energético.* Implica toda energía eléctrica consumida por los equipos eléctricos y electrónicos.

En los siguientes subapartados se analizará la cantidad desechada de agentes contaminantes y, además, se estimará el cálculo de la huella de carbono consecuente del desarrollo del proyecto para cada fase del mismo.

6.1. Clasificación y análisis de los agentes con impacto ambiental

Este primer subapartado se encuentra destinado a clasificar, en la tabla 6.1, todos aquellos agentes contaminantes que se han ido usando a lo largo del proyecto. Decir que algunos de ellos se encuentran cuantificados de manera estimada, por la imposibilidad de medir dicho recurso con exactitud. Para el consumo energético se consideran 180 W de consumo de los equipos informáticos y las horas dedicadas se encontrarán definidas en la tabla 7.1.

Tabla 6.1. Clasificación y análisis de los agentes con impacto ambiental en cada fase del proyecto.

Fases	Residuos informáticos	Residuos de material de oficina	Consumo energético
Estudio y definición de los objetivos y el alcance del proyecto	~10gr. tóner	~10 folios	2,7 kWh
Búsqueda e investigación de los conceptos teóricos desarrollados	~20gr. tóner	~80 folios	20,7 kWh

Implementación y programación de los códigos y algoritmos resolutivos con <i>Matlab</i>	Despreciable	Despreciable	34,2 kWh
Comprobaciones, reestructuraciones y validaciones de todos los cálculos y resultados obtenidos	~5 gr. tóner	Despreciable	25,2 kWh
Transcripción y elaboración de la memoria del proyecto	~70gr. tóner	~210 folios	39,6 kWh
TOTAL	~105 gr. tóner	~300 folios, 4 bolígrafos, 30 post-it.	122,4 kWh

6.2. Cálculo de la huella de carbono

Según la RAE [22], se define huella de carbono como: “*Totalidad de gases de efecto invernadero provenientes, por efecto directo o indirecto, de la actividad de una organización*”. Dichos gases de efecto invernadero (GEI) se miden como masa de CO₂ equivalente.

Tal como se ha dicho, este proyecto presenta un tipo de emisiones a las cuales se les considera indirectas. Entonces, únicamente se deberán cuantificar dos tipos de emisiones, primero, las derivadas del consumo de energía eléctrica (alcance 2) y, segundo, otras que provienen de la fabricación de los productos y servicios que son adquiridos para el desarrollo del mismo (alcance 3), como puede ser el material de oficina.

6.2.1. Emisiones indirectas por energía eléctrica

Este tipo de emisiones se justifican como los gases de efecto invernadero que se generan para la producción y abastecimiento de la misma. Su cálculo se lleva a cabo a partir del cómputo total de energía eléctrica consumida en kWh por el MIX de la red.

Conociendo que el consumo energético estimado es de 122,4 kWh (tabla 6.1) y el MIX de 241 g·CO₂/kWh [23], el cálculo correspondiente quedaría:

$$HdC_1 = 122,4 \text{ kWh} \cdot 241 \frac{\text{g} \cdot \text{CO}_2}{\text{kWh}} = 29,5 \text{ kg} \cdot \text{CO}_2 \quad (\text{Eq. 6.1})$$

6.2.2. Otras emisiones indirectas

Las emisiones de alcance 3 incluyen todas aquellas emisiones que son producidas en la denominada cadena de valor de una empresa o sistema productivo, sin tener en cuenta las generadas a partir de la electricidad, calefacción y refrigeración. Éstas son las más difíciles de

cuantificar, por la gran cantidad de procesos y productos que se necesitan en dicha cadena de producción.

Debido al reducido material de oficina empleado (tabla 6.1) se menosprecia la huella de carbono de este tipo.

$$HdC_2 = 0 \text{ kg} \cdot \text{CO}_2 \quad (\text{Eq. 6.2})$$

6.2.3. Huella de carbono total

Finalmente, tras analizar el tipo de herramientas que se han utilizado en este proyecto y su correspondiente cálculo parcial de huella de carbono, a continuación, se calcula la huella de carbono total producida en este proyecto.

Tabla 6.2. Cómputo final de la huella de carbono total.

Tipo de emisión	Valor de emisión
Alcance 2	29,5 kg·CO ₂
Alcance 3	0,0 kg·CO ₂
TOTAL =	29,5 kg·CO₂

Analizando los kg de CO₂ obtenidos del correspondiente cálculo, se concluye afirmando que el proyecto presenta un impacto ambiental muy reducido, tal como se esperaba, al ser un trabajo teórico e informático.

7. Presupuesto

Al tratarse de un proyecto de investigación, pudiendo ser derivado a petición de una empresa para un desarrollo en innovación (I+D) o bien para la formación de su personal, se puede considerar como un trabajo hecho por parte de un autónomo o un docente universitario, es por ello que se podría desarrollar un presupuesto amplio y diverso. Todo y eso, en este apartado, se realizará un análisis económico básico fundamentado en dos partes: coste de los recursos humanos y costes de los recursos materiales.

7.1. Costes de los recursos humanos

Para el cálculo de los costes de los recursos humanos, se desarrolla en la tabla 7.1 las horas necesarias para cada parte del proyecto, de dónde se obtendrá el valor monetario de dichas horas dedicadas considerando que el precio por hora es de 40€/h.

Tabla 7.1. Coste de los recursos humanos.

Concepto	t requerido (h)	Precio por hora (€/h)	Subtotal (€)
Estudio y definición de los objetivos y el alcance del proyecto	15	40	600,00
Búsqueda e investigación de los conceptos teóricos desarrollados	115	40	4.600,00
Implementación y programación de los códigos y algoritmos resolutivos con <i>Matlab</i>	200	40	8.000,00
Comprobaciones, reestructuraciones y validaciones de todos los cálculos y resultados obtenidos	140	40	5.600,00
Transcripción y elaboración de la memoria del proyecto	210	40	8.400,00
TOTAL =	680 h		27.200,00 €

El coste asociado a los recursos humanos equivale a 27.200,00 €.

7.2. Costes de los recursos materiales

En cuanto a los recursos materiales, en la tabla 7.2 se desglosan todos los bienes empleados para satisfacer los objetivos del proyecto, junto con su valor de mercado y, además, se adjunta un balance final del conjunto.

Tabla 7.2. Costes de los recursos materiales.

Concepto	Subtotal
	(€)
Licencia de uso: "Matlab and Simulink Student Suite"	69,00
Suscripción Microsoft Office 365 Personal	69,00
Amortización de equipos informáticos	200,00
Material de oficina	20,00
Recursos energéticos (Consumo eléctrico)	24,38
Servicios de telecomunicaciones	60,00
TOTAL =	442,38 €

El coste asociado a los recursos materiales equivale a 442,38 €.

7.3. Costes totales

En último lugar, se realiza y especifica el coste total asociado al proyecto completo, con los valores antes y después de impuestos.

Tabla 7.3. Desglose y cálculo de los costes totales.

Tipo de coste	Precio
Costes totales de los recursos humanos	27.200,00 €
Costes totales de los recursos materiales	442,38 €
Subtotal (BAII) =	27.642,38 €
IVA (21%) =	5.804,90 €
TOTAL =	33.447,28 €

El coste total del presente proyecto es de:

33.447,28 €

TREINTA Y TRES MIL CUATROCIENTOS CUARENTA Y SIETE EUROS CON VEINTIOCHO CÉNTIMOS.

Conclusiones

El desarrollo de este proyecto me ha ayudado a fundamentar con unas bases más sólidas ciertos conceptos previamente estudiados en las asignaturas de Sistemas eléctricos de potencia (SEPEE) y Análisis de sistemas eléctricos de potencia (ASEPE). Estos conceptos son: el sistema eléctrico de potencia, la matriz de admitancias de bus y flujo de cargas fundamental. A partir de este punto, he podido adquirir nuevos conocimientos y así expandir mi punto de vista sobre los estudios existentes que les corresponde a las redes eléctricas de potencia. En primer lugar, el método de las matrices de incidencia ha facilitado en gran medida la formulación del cálculo de las matrices Y_{BUS} y, posteriormente y con mayor relevancia, el flujo armónico de cargas me ha mostrado un nuevo enfoque a este campo, observando por mí mismo la importancia que toma el considerar los efectos de los armónicos en el estudio de las redes.

Asimismo, tal como se ha ido viendo a lo largo del proyecto, todos los cálculos, procedimientos y desarrollos matemáticos se han obtenido a partir de códigos programados en *Matlab*, total y completamente hechos por mí. Estos se han creado con la finalidad de que por si solos calcularan tanto las matrices de admitancias de bus, como el FLF e incluso el HLF completo, todo ello completamente automatizado y siendo adaptables a los datos de entrada de cualquier red, sea la que sea. Sobre estos códigos puedo garantizar un completo y laborioso desarrollo de todos los cálculos para distintas situaciones de la red, todos ellos con garantías de dar los resultados correctos, de forma detallada y ordenada. Todos los códigos se presentan en los tres anexos de este proyecto.

En tercer lugar, quiero comentar que el proyecto completo ha resultado muy satisfactorio, no solo por el valioso aprendizaje que me ha aportado y los nuevos conocimientos adquiridos en todos los aspectos, sino que también por los buenos resultados que he obtenido tras todo el arduo trabajo que ha acarreado, ya que tras todos y cada uno de los análisis, se concluía de manera grata tras determinar que todo era correcto y, además, cumplía con los objetivos establecidos.

Para cerrar este trabajo de final de grado, referente al estudio del flujo armónico de cargas en redes eléctricas IEEE n-buses, remarcar la importancia, de la cual se ha ido tomando conciencia a lo largo del mismo, respecto a realizar un buen y detallado estudio a la hora de trabajar con sistemas eléctricos de potencia. Por un lado, determinar en qué condiciones se encuentra trabajando el SEP a frecuencia fundamental y, a continuación, estudiar el espectro armónico que presenta las corrientes y tensiones de dicha red para así, finalmente, tomar todas las medidas correctoras necesarias para poder garantizar un suministro fiable y de calidad.

Bibliografía

- [1] A. Sumper and J. J. Mesas García, *Sistemas Eléctricos de Potencia*. 2018.
- [2] A. Sumper and J. J. Mesas García, “Análisis en régimen permanente de líneas aéreas,” in *Sistemas Eléctricos de Potencia*, 2019, pp. 1–51.
- [3] A. Sumper and J. J. Mesas García, “Transformadores,” in *Sistemas Eléctricos de Potencia*, 2019, pp. 1–34.
- [4] K. Meena, “Module 2: Load Flow Analysis.”
- [5] “IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers).” [Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/Xplore/home.jsp>. [Accessed: 10-Apr-2020].
- [6] R. S. H. Abaali, T. Talbi, “Comparison of Newton-Raphson and Gauss-Seidel Methods for Power Flow Analysis,” *Int. J. Energy Power Eng.*, vol. 12, pp. 627–633, 2018.
- [7] “Power Cases - Illinois Center for a Smarter Electric Grid (ICSEG).” [Online]. Available: <https://icseg.iti.illinois.edu/power-cases/>. [Accessed: 19-Mar-2020].
- [8] “Network Matrices - Power System Analysis.”
- [9] N. Gutiérrez Williams, “Formación de matriz de admitancia nodal Ybus,” 2010.
- [10] “MathWorks - Creadores de MATLAB y Simulink - MATLAB y Simulink - MATLAB & Simulink.” [Online]. Available: https://es.mathworks.com/?s_tid=gn_logo. [Accessed: 28-May-2020].
- [11] J. J. Mesas García, “Estudio del flujo de cargas,” in *Análisis de Sistemas Eléctricos de Potencia*, 2019, pp. 1–64.
- [12] Boletín Oficial del Estado, *Reglamento de Alta Tensión. Real Decreto 337/2014*. España: BOE, 2014, pp. 43598–43728.
- [13] Boletín Oficial del Estado, *Resolución de 1 de febrero de 2018. BOE-A-2018-2198*. España: BOE, 2018, pp. 18835–18875.
- [14] A. Gómez Expósito, *Análisis y operación de sistemas de energía eléctrica*. Madrid, [etc.]: McGraw Hill Interamericana, 2002.
- [15] R. Abu-Hashim, “Test Systems for Harmonics Modeling and Simulation,” *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 14, pp. 579–587, 1999.
- [16] S. J. Ranade, “Modeling and simulation of the propagation of harmonics in electric power networks, Part 1: Concepts, models and simulation techniques,” *IEEE Trans. Power Delivery*, vol. 11, no. 1, pp. 452–465, 1996.
- [17] S. J. Ranade, “Modeling and simulation of the propagation of harmonics in electric power networks, Part 2: Sample systems and examples,” *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 11, no. 1,

pp. 466–474, 1996.

- [18] C. G. de T. 36-05, “Harmoniques, paramètres caractéristiques, méthodes d’étude, estimation de valeurs existantes en réseau,” 1981.
- [19] W. Xu, J. E. Drakos, Y. Mansour, and A. Chang, “A three-phase converter model for harmonic analysis of HVDC systems,” *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 9, no. 3, pp. 1724–1731, 1994.
- [20] E. O. Caceres Chura, “Estudio y análisis de armónicos en rectificadores estáticos de potencia eléctrica utilizando series de Fourier, para la región de Puno,” Universidad Nacional del Altiplano, 2019.
- [21] A. Rashid, J. J. Mesas, and L. Sainz, “An Improved Harmonic Load Flow Formulation,” *Electr. Power Components Syst.*, vol. 47, no. 16–17, pp. 1562–1573, 2019.
- [22] “Real Academia Española.” [Online]. Available: <https://www.rae.es/>. [Accessed: 16-Jun-2020].
- [23] “Factor de emisión de la energía eléctrica: el mix. Cambio climático.” [Online]. Available: https://canviclimatic.gencat.cat/es/actua/factors_demissio_associats_a_lenergia/. [Accessed: 16-Jun-2020].

Anexo A. Matriz de admitancias de bus (Y_{BUS})



A1. Código en *Matlab* para calcular las Y_{BUS} de las redes IEEE n-buses con el método de las matrices de incidencia

Ybus_nbuses_CartielArasa.m

1 of 3

```

1 function Ybus_nbuses_CartielArasa
2
3 clear all
4 close all
5 clc
6
7 disp(['Matriz de admitancias de bus en Redes IEEE n-buses:'])
8 disp([' ']);
9
10 NB=input('- De que red IEEE n-buses quiere conocer su Ybus? ¿3, 14 o 30 buses? =↙
');
11 if NB==3 || NB==14 || NB==30
12     disp([' ']);
13 else
14     disp(['ERROR!']);
15     return
16 end
17
18 Sb=100; %MVA
19
20 % Recolección de datos en Excel de las redes IEEE n-buses
21
22 if NB==3 % Red IEEE 3-buses
23     filename1 = 'Datos Lineas_n3.xlsx';
24     [a]=xlsread(filename1,'A4:C6');
25     [b]=xlsread(filename1,'E4:K6');
26 elseif NB==14 % Red IEEE 14-buses
27     filename1 = 'Datos Lineas_n14.xlsx';
28     [a]=xlsread(filename1,'A4:C17');
29     [b]=xlsread(filename1,'E4:K23');
30 else % Red IEEE 30-buses
31     filename1 = 'Datos Lineas_n30.xlsx';
32     [a]=xlsread(filename1,'A4:C33');
33     [b]=xlsread(filename1,'E4:K44');
34 end
35
36 [a1,a2]=size(a);
37 [b1,b2]=size(b);
38
39 e=a1+3*b1; % e => Numero de Impedancias
40 nod=a1; % a1 => Numero de Nodos
41
42
43 % Matriz y
44
45 ax=0; %Parámetro a transformadores
46 y0=zeros(e,1);
47
48 for i=1:a1 % Admitancias Shunt de Bus
49     y0(i,1)=a(i,2)+1j*a(i,3);
50 end
51 for i=(a1+1):(a1+b1) % Líneas de Transporte y Trafos Zt
52     if b((i-a1),7)==0
53         y0(i,1)=1/(b((i-a1),4)+1j*b((i-a1),5));
54     else
55         ax=b((i-a1),7);

```

```

56     y0(i,1)=1/(b((i-a1),4)+1j*b((i-a1),5))*(1/ax);
57     end
58 end
59 for i=(a1+b1+1):(a1+b1*2) % Líneas de Transporte y Trafos Yt1
60     if b((i-a1-b1),7)==0
61         y0(i,1)=1j*b((i-a1-b1),6);
62     else
63         ax=b((i-a1-b1),7);
64         y0(i,1)=(1/(b((i-a1-b1),4)+1j*b((i-a1-b1),5)))*((ax-1)/ax);
65     end
66 end
67 for i=(a1+b1*2+1):e % Líneas de Transporte y Trafos Yt2
68     if b((i-a1-b1*2),7)==0
69         y0(i,1)=1j*b((i-a1-b1*2),6);
70     else
71         ax=b((i-a1-b1*2),7);
72         y0(i,1)=(1/(b((i-a1-b1*2),4)+1j*b((i-a1-b1*2),5)))*((1-ax)/(ax^2));
73     end
74 end
75
76
77 y = [zeros(e,e)];
78 for k = 1:e
79     y(k,k)=y0(k,1);
80 end
81
82
83 % Matriz A
84
85 A=[zeros(e,nod)];
86 nm=0;
87 nm1=0;
88 nm2=0;
89
90 for i=1:a1 % Admitancias Shunt de Bus
91     nm=a(i,1);
92     A(i,nm)=-1;
93     nm=0;
94 end
95 for i=(a1+1):(a1+b1) % Líneas de Transporte y Trafos Zt
96     nm1=b((i-a1),2);
97     A(i,nm1)=1;
98     nm1=0;
99
100     nm2=b((i-a1),3);
101     A(i,nm2)=-1;
102     nm2=0;
103 end
104 for i=(a1+b1+1):(a1+b1*2) % Líneas de Transporte y Trafos Yt1
105     nm=b((i-a1-b1),2);
106     A(i,nm)=-1;
107     nm=0;
108 end
109 for i=(a1+b1*2+1):e % Líneas de Transporte y Trafos Yt2
110     nm=b((i-a1-b1*2),3);
111     A(i,nm)=-1;

```

Ybus_nbuses_CartielArasa.m

3 of 3

```
112     nm=0;
113 end
114
115 % A traspuesta
116
117 At=A';
118
119 % Cálculo Ybus
120
121 Ybus=At*y*A;
122
123 % Dimensión de Ybus
124
125 [N]=size(Ybus);
126
127
128 % Display Resultados
129
130 fprintf('Ybus de la red IEEE %d-buses:\n',NB)
131 Ybus
132
133 end
134
135
```


Anexo B. Resolución del flujo de cargas fundamental (FLF)

B1. Código en *Matlab* para resolver el FLF de las redes IEEE n-buses mediante Gauss-Seidel

FLF_nbuses_GS_CartielArasa.m

1 of 10

```

1 function FLF_nbuses_GS_CartielArasa
2
3 clear all
4 close all
5 clc
6
7 disp(['Resolución del Problema de Flujo de Cargas Fundamental en Redes IEEE n-
buses mediante GAUSS-SEIDEL:'])
8 disp([' ']);
9
10 NB=input('- Que red IEEE n-buses quiere resolver? ¿3, 14 o 30 buses? = ');
11 if NB==3 || NB==14 || NB==30
12     disp([' ']);
13 else
14     disp(['ERROR!']);
15     return
16 end
17
18 QLIM=input('- Quiere tener en cuenta los limites de generación de Q? (SI=0 o NO=1)
= ');
19 if QLIM==0 || QLIM==1
20     disp([' ']);
21 else
22     disp(['ERROR!']);
23     return
24 end
25 if QLIM==0
26     fprintf('Red IEEE %d-buses CON límites de Q:\n',NB);
27 else
28     fprintf('Red IEEE %d-buses SIN límites de Q:\n',NB);
29 end
30
31
32 Sb=100; %MVA
33
34
35 % CÁLCULO DE YBUS
36
37 if NB==3
38     filename1 = 'Datos Lineas_n3.xlsx';
39     [a]=xlsread(filename1,'A4:C6');
40     [b]=xlsread(filename1,'E4:K6');
41 elseif NB==14
42     filename1 = 'Datos Lineas_n14.xlsx';
43     [a]=xlsread(filename1,'A4:C17');
44     [b]=xlsread(filename1,'E4:K23');
45 else
46     filename1 = 'Datos Lineas_n30.xlsx';
47     [a]=xlsread(filename1,'A4:C33');
48     [b]=xlsread(filename1,'E4:K44');
49 end
50
51 [a1,a2]=size(a);
52 [b1,b2]=size(b);
53
54 e=a1+3*b1; % e => Numero de Impedancias

```

```

55 nod=a1; % a1 => Numero de Nodos
56
57 % Matriz y
58
59 ax=0; %Parámetro a transformadores
60 y0=zeros(e,1);
61
62 for i=1:a1 % Admitancias Shunt de Bus
63     y0(i,1)=a(i,2)+1j*a(i,3);
64 end
65 for i=(a1+1):(a1+b1) % Líneas de Transporte y Trafos Zt
66     if b((i-a1),7)==0
67         y0(i,1)=1/(b((i-a1),4)+1j*b((i-a1),5));
68     else
69         ax=b((i-a1),7);
70         y0(i,1)=1/(b((i-a1),4)+1j*b((i-a1),5))*(1/ax);
71     end
72 end
73 for i=(a1+b1+1):(a1+b1*2) % Líneas de Transporte y Trafos Yt1
74     if b((i-a1-b1),7)==0
75         y0(i,1)=1j*b((i-a1-b1),6);
76     else
77         ax=b((i-a1-b1),7);
78         y0(i,1)=(1/(b((i-a1-b1),4)+1j*b((i-a1-b1),5)))*(ax-1)/ax);
79     end
80 end
81 for i=(a1+b1*2+1):e % Líneas de Transporte y Trafos Yt1
82     if b((i-a1-b1*2),7)==0
83         y0(i,1)=1j*b((i-a1-b1*2),6);
84     else
85         ax=b((i-a1-b1*2),7);
86         y0(i,1)=(1/(b((i-a1-b1*2),4)+1j*b((i-a1-b1*2),5)))*((1-ax)/(ax^2));
87     end
88 end
89
90
91 y = zeros(e,e);
92 for k = 1:e
93     y(k,k)=y0(k,1);
94 end
95
96
97 % Matriz A
98
99 A=zeros(e,nod);
100 nm=0;
101 nm1=0;
102 nm2=0;
103
104 for i=1:a1 % Admitancias Shunt de Bus
105     nm=a(i,1);
106     A(i,nm)=[-1];
107     nm=0;
108 end
109 for i=(a1+1):(a1+b1) % Líneas de Transporte y Trafos Zt
110     nm1=b((i-a1),2);

```

```

111     A(i,nm1)=1;
112     nm1=0;
113
114     nm2=b((i-a1),3);
115     A(i,nm2)=-1;
116     nm2=0;
117 end
118 for i=(a1+b1+1):(a1+b1*2) % Líneas de Transporte y Trafos Yt1
119     nm=b((i-a1-b1),2);
120     A(i,nm)=-1;
121     nm=0;
122 end
123 for i=(a1+b1*2+1):e % Líneas de Transporte y Trafos Yt2
124     nm=b((i-a1-b1*2),3);
125     A(i,nm)=-1;
126     nm=0;
127 end
128
129 % A Traspuesta
130
131 At=A';
132
133 % Cálculo Ybus
134
135 Ybus=At*y*A
136
137 % Dimensión de Ybus
138
139 [N]=size(Ybus);
140
141
142
143 % DESARROLLO FLF GS
144
145 % Datos de los buses
146
147 if NB==3
148     if QLIM==0
149         filename2 = 'Datos Buses_n3_ConQlim.xlsx';
150     else
151         filename2 = 'Datos Buses_n3_SinQlim.xlsx';
152     end
153     [Dx]=xlsread(filename2,'A4:J6');
154 elseif NB==14
155     if QLIM==0
156         filename2 = 'Datos Buses_n14_ConQlim.xlsx';
157     else
158         filename2 = 'Datos Buses_n14_SinQlim.xlsx';
159     end
160     [Dx]=xlsread(filename2,'A4:J17');
161 else
162     if QLIM==0
163         filename2 = 'Datos Buses_n30_ConQlim.xlsx';
164     else
165         filename2 = 'Datos Buses_n30_SinQlim.xlsx';
166     end

```

```
167     [Dx]=xlsread(filename2,'A4:J33');
168 end
169
170 Di=[Dx'];
171
172 [n,info]=size(Dx); % n° total de buses
173
174
175 % 2 - V
176
177 Vi=[ones(1,n)];
178
179 for i=1:n
180     Vi(i)=Di(2,i);
181 end
182
183 % 3 - delta
184
185 deltai=[ones(1,n)];
186
187 for i=1:n
188     deltai(i)=Di(3,i);
189 end
190
191 % 4 - PG
192
193 PGi=[ones(1,n)];
194
195 for i=1:n
196     PGi(i)=Di(4,i)/Sb;
197 end
198
199 % 5 - QG
200
201 QGi=[ones(1,n)];
202
203 for i=1:n
204     QGi(i)=Di(5,i)/Sb;
205 end
206
207 % 6 - PD
208
209 PDi=[ones(1,n)];
210
211 for i=1:n
212     PDi(i)=Di(6,i)/Sb;
213 end
214
215 % 7 - QD
216
217 QDi=[ones(1,n)];
218
219 for i=1:n
220     QDi(i)=Di(7,i)/Sb;
221 end
222
```

```

223 % 8 - Qmin
224
225 Qmini=[ones(1,n)];
226
227 for i=1:n
228     Qmini(i)=Di(8,i)/Sb;
229 end
230
231 % 9 - Qmax
232
233 Qmaxi=[ones(1,n)];
234
235 for i=1:n
236     Qmaxi(i)=Di(9,i)/Sb;
237 end
238
239 % * - p
240
241 P=[ones(1,n)];
242
243 for i=1:n
244     P(i)=PGi(i)-PDi(i);
245 end
246
247 % * - Q
248
249 Q=[ones(1,n)];
250
251 for i=1:n
252     Q(i)=QGi(i)-QDi(i);
253 end
254
255
256 % Contabilización Cantidad de Buses
257
258 r=0; % n° de buses PV
259 for i=2:n
260     if Di(10,i)==2
261         r=r+1;
262     else
263         r=r+0;
264     end
265 end
266
267 q=n-r-1; % n° de buses PQ
268
269
270 % Bus 1: Slack
271 V1=Vi(1)*exp(lj*deltai(1));
272
273
274 % Bucle y Resultados GAUSS-SEIDEL:
275
276 iter=0;
277 V=[ones(1,n-1)];
278

```

```

279 for i=2:n
280     V0=Vi(i)*exp(1j*deltai(i)*(pi/180));
281     V(i-1)=V0;
282 end
283
284 error=10;
285 V_all_GS=[iter V];
286 error_all_GS=[iter error zeros(1,n-1)];
287
288 Vc=[Vi(1) abs(V)];
289 deltac=[deltai(1) angle(V)];
290
291 while error>=1e-10 && iter<1000
292     V_old=V;
293
294     for i=2:n
295         if Di(10,i)==3 % BUSES PQ
296             s1=0;
297             s2=0;
298
299             if (i-1)<2
300                 s1=0;
301             else
302                 for k=2:(i-1)
303                     s1=s1+(Ybus(i,k)*V(k-1));
304                 end
305             end
306
307             if (i+1)>n
308                 s2=0;
309             else
310                 for j=(i+1):n
311                     s2=s2+(Ybus(i,j)*V_old(j-1));
312                 end
313             end
314
315             V(i-1)=(1/Ybus(i,i))*((P(i)-1j*Q(i))/conj(V_old(i-1))-Ybus(i,1)*V1-s1-
s2);
316
317
318         else % BUSES PV
319             s3=0;
320             s4=0;
321
322             % Calculo Q_x
323             if (i-1)<2
324                 s3=0;
325             else
326                 for k=2:(i-1)
327                     s3=s3+(Ybus(i,k)*V(k-1));
328                 end
329             end
330
331             if i>n
332                 s4=0;
333             else

```

```

334         for j=i:n
335             s4=s4+(Ybus(i,j)*V_old(j-1));
336         end
337     end
338
339     Qx=imag(V_old(i-1)*conj(Ybus(i,1)*V1+s3+s4));
340
341     if (Qx>Qmini(i)) && (Qx<Qmaxi(i))
342         % Calculo delta_x
343         s5=0;
344         s6=0;
345         if (i-1)<2
346             s5=0;
347         else
348             for k=2:(i-1)
349                 s5=s5+(Ybus(i,k)*V(k-1));
350             end
351         end
352         if (i+1)>n
353             s6=0;
354         else
355             for j=(i+1):n
356                 s6=s6+Ybus(i,j)*V_old(j-1);
357             end
358         end
359         deltax=angle((1/Ybus(i,i))*((P(i)-1j*Qx)/conj(V_old(i-1))-Ybus(i,
360 1)*V1-s5-s6));
361         V(i-1)=Vi(i)*exp(1j*deltax);
362     elseif Qx>=Qmaxi(i)
363         s7=0;
364         s8=0;
365         if (i-1)<2
366             s7=0;
367         else
368             for k=2:(i-1)
369                 s7=s7+(Ybus(i,k)*V(k-1));
370             end
371         end
372
373         if (i+1)>n
374             s8=0;
375         else
376             for j=(i+1):n
377                 s8=s8+(Ybus(i,j)*V_old(j-1));
378             end
379         end
380
381         V(i-1)=(1/Ybus(i,i))*((P(i)-1j*Qmaxi(i))/conj(V_old(i-1))-Ybus(i,
382 1)*V1-s7-s8);
383     else
384         s9=0;
385         s10=0;
386         if (i-1)<2
387             s9=0;

```



```

388         else
389             for k=2:(i-1)
390                 s9=s9+(Ybus(i,k)*V(k-1));
391             end
392         end
393
394         if (i+1)>n
395             s10=0;
396         else
397             for j=(i+1):n
398                 s10=s10+(Ybus(i,j)*V_old(j-1));
399             end
400         end
401
402         V(i-1)=(1/Ybus(i,i))*((P(i)-1j*Qmini(i))/conj(V_old(i-1))-Ybus(i,
403 1)*V1-s9-s10);
404     end
405 end
406
407 error=norm(abs(V-V_old),inf);
408 %error=norm(abs(x-x_old),2);
409 errorVtot=[abs(V-V_old)];
410
411 iter=iter+1;
412
413 V_all_GS=[V_all_GS; iter V];
414 error_all_GS=[error_all_GS; iter error errorVtot];
415
416 Vc=[Vc; Vi(1) abs(V)];
417 deltac=[deltac; deltai(1) angle(V)];
418 end
419 end
420
421 iter
422
423
424 %Potencias Inyectadas
425
426 Vf=[V1 V];
427 S=[zeros(1,n)];
428
429 for i=1:n
430     sm=0;
431     for j=1:n
432         sm=sm+(Ybus(i,j)*Vf(j));
433     end
434     S(i)=Vf(i)*conj(sm);
435 end
436
437
438 % Potencias Demandadas y Generadas
439
440 SD=[zeros(1,n)];
441 SG=[zeros(1,n)];
442

```

```

443 for i=1:n
444     if i==1
445         SD(i)=PDi(i)+1j*QDi(i);
446         SG(i)=S(i)+SD(i);
447     elseif Di(10,i)==2
448         QGx=imag(S(i))+QDi(i);
449         SG(i)=PGi(i)+1j*QGx;
450         SD(i)=PDi(i)+1j*QDi(i);
451     else
452         SD(i)=PDi(i)+1j*QDi(i);
453         SG(i)=PGi(i)+1j*QGi(i);
454     end
455 end
456
457 QG=[imag(SG)];
458
459 % Rendimiento de la Red
460
461 i=1;
462 num=0;
463 den=0;
464 while i<=n
465     if real(S(i))<0
466         num=num+abs(real(S(i)));
467     else
468         den=den+abs(real(S(i)));
469     end
470     i=i+1;
471 end
472
473
474 Rendimiento=100*num/den
475
476 % Pérdidas en la Red
477
478 deltaP=real(sum(S))
479
480
481 % Exportación de Resultados GS
482
483 if QLIM==0
484     xlswrite(sprintf('Resultados_n%dGS_ConQlim.xlsx',NB), (Vc(iter,:))', 'Resultados
Resultados Finales', 'B4')
485     xlswrite(sprintf('Resultados_n%dGS_ConQlim.xlsx',NB), (deltac(iter,:))*
(180/pi))', 'Resultados Finales', 'C4')
486     xlswrite(sprintf('Resultados_n%dGS_ConQlim.xlsx',NB), real(S)', 'Resultados
Resultados Finales', 'D4')
487     xlswrite(sprintf('Resultados_n%dGS_ConQlim.xlsx',NB), imag(S)', 'Resultados
Resultados Finales', 'E4')
488
489     xlswrite(sprintf('Resultados_n%dGS_ConQlim.xlsx',NB), (Vc)', 'Vbus', 'A2')
490     xlswrite(sprintf('Resultados_n%dGS_ConQlim.xlsx',NB), (V_all_GS(:,
1))', 'Vbus', 'A1')
491     xlswrite(sprintf('Resultados_n%dGS_ConQlim.xlsx',NB), (deltac*(180/pi))', 'delta
Vbus', 'A2')
492     xlswrite(sprintf('Resultados_n%dGS_ConQlim.xlsx',NB), (V_all_GS(:,1))', 'delta

```

```

Vbus','A1')
493     xlswrite(sprintf('Resultados_n%dGS_ConQlim.xlsx',NB),real(S),'Pinj','A2')
494     xlswrite(sprintf('Resultados_n%dGS_ConQlim.xlsx',NB),imag(S),'Qinj','A2')
495     xlswrite(sprintf('Resultados_n%dGS_ConQlim.xlsx',NB),
error_all_GS,'Errores','A2')
496
497     fprintf('END (Mirar archivo: Resultados_n%dGS_ConQlim.xlsx)',NB)
498
499 else
500     xlswrite(sprintf('Resultados_n%dGS_SinQlim.xlsx',NB),(Vc(iter,:)),'Resultados
Finales','B4')
501     xlswrite(sprintf('Resultados_n%dGS_SinQlim.xlsx',NB),(deltac(iter,:)*
(180/pi)),'Resultados Finales','C4')
502     xlswrite(sprintf('Resultados_n%dGS_SinQlim.xlsx',NB),real(S),'Resultados
Finales','D4')
503     xlswrite(sprintf('Resultados_n%dGS_SinQlim.xlsx',NB),imag(S),'Resultados
Finales','E4')
504
505     xlswrite(sprintf('Resultados_n%dGS_SinQlim.xlsx',NB),(Vc),'Vbus','A2')
506     xlswrite(sprintf('Resultados_n%dGS_SinQlim.xlsx',NB),(V_all_GS(:,
1)),'Vbus','A1')
507     xlswrite(sprintf('Resultados_n%dGS_SinQlim.xlsx',NB),(deltac*(180/pi)),'delta
Vbus','A2')
508     xlswrite(sprintf('Resultados_n%dGS_SinQlim.xlsx',NB),(V_all_GS(:,1)),'delta
Vbus','A1')
509     xlswrite(sprintf('Resultados_n%dGS_SinQlim.xlsx',NB),real(S),'Pinj','A2')
510     xlswrite(sprintf('Resultados_n%dGS_SinQlim.xlsx',NB),imag(S),'Qinj','A2')
511     xlswrite(sprintf('Resultados_n%dGS_SinQlim.xlsx',NB),
error_all_GS,'Errores','A2')
512
513     fprintf('END (Mirar archivo: Resultados_n%dGS_SinQlim.xlsx)',NB)
514
515 end
516
517
518 end
519
520

```

B2. Código en *Matlab* para resolver el FLF de las redes IEEE n-buses mediante Newton-Raphson

FLF_nbuses_NR_CartielArasa.m

1 of 11

```

1 function FLF_nbuses_NR_CartielArasa
2
3 clear all
4 close all
5 clc
6
7 disp(['Resolución del Problema de Flujo de Cargas Fundamental en Redes IEEE n-
buses mediante NEWTON-RAPHSON:'])
8 disp([' ']);
9
10 NB=input('- Que red IEEE n-buses quiere resolver? ¿3, 14 o 30 buses? = ');
11 if NB==3 || NB==14 || NB==30
12     disp([' ']);
13 else
14     disp(['ERROR!']);
15     return
16 end
17
18 QLIM=input('- Quiere tener en cuenta los limites de generación de Q? (SI=0 o NO=1)
= ');
19 if QLIM==0 || QLIM==1
20     disp([' ']);
21 else
22     disp(['ERROR!']);
23     return
24 end
25 if QLIM==0
26     fprintf('Red IEEE %d-buses CON límites de Q:\n',NB);
27 else
28     fprintf('Red IEEE %d-buses SIN límites de Q:\n',NB);
29 end
30
31 Sb=100; %MVA
32
33
34 % CÁLCULO DE YBUS
35
36 if NB==3
37     filename1 = 'Datos Lineas_n3.xlsx';
38     [a]=xlsread(filename1,'A4:C6');
39     [b]=xlsread(filename1,'E4:K6');
40 elseif NB==14
41     filename1 = 'Datos Lineas_n14.xlsx';
42     [a]=xlsread(filename1,'A4:C17');
43     [b]=xlsread(filename1,'E4:K23');
44 else
45     filename1 = 'Datos Lineas_n30.xlsx';
46     [a]=xlsread(filename1,'A4:C33');
47     [b]=xlsread(filename1,'E4:K44');
48 end
49
50 [a1,a2]=size(a);
51 [b1,b2]=size(b);
52
53 e=a1+3*b1; % e => Numero de Impedancias
54 nod=a1; % a1 => Numero de Nodos

```

```

55
56 % Matriz y
57
58 ax=0; %Parámetro a transformadores
59 y0=zeros(e,1);
60
61 for i=1:a1 % Admitancias Shunt de Bus
62     y0(i,1)=a(i,2)+1j*a(i,3);
63 end
64 for i=(a1+1):(a1+b1) % Líneas de Transporte y Trafos Zt
65     if b((i-a1),7)==0
66         y0(i,1)=1/(b((i-a1),4)+1j*b((i-a1),5));
67     else
68         ax=b((i-a1),7);
69         y0(i,1)=1/(b((i-a1),4)+1j*b((i-a1),5))*(1/ax);
70     end
71 end
72 for i=(a1+b1+1):(a1+b1*2) % Líneas de Transporte y Trafos Yt1
73     if b((i-a1-b1),7)==0
74         y0(i,1)=1j*b((i-a1-b1),6);
75     else
76         ax=b((i-a1-b1),7);
77         y0(i,1)=(1/(b((i-a1-b1),4)+1j*b((i-a1-b1),5)))*(ax-1)/ax);
78     end
79 end
80 for i=(a1+b1*2+1):e % Líneas de Transporte y Trafos Yt2
81     if b((i-a1-b1*2),7)==0
82         y0(i,1)=1j*b((i-a1-b1*2),6);
83     else
84         ax=b((i-a1-b1*2),7);
85         y0(i,1)=(1/(b((i-a1-b1*2),4)+1j*b((i-a1-b1*2),5)))*((1-ax)/(ax^2));
86     end
87 end
88
89
90 y = [zeros(e,e)];
91 for k = 1:e
92     y(k,k)=y0(k,1);
93 end
94
95
96 % Matriz A
97
98 A=zeros(e,nod);
99 nm=0;
100 nm1=0;
101 nm2=0;
102
103 for i=1:a1 % Admitancias Shunt de Bus
104     nm=a(i,1);
105     A(i,nm)=[-1];
106     nm=0;
107 end
108 for i=(a1+1):(a1+b1) % Líneas de Transporte y Trafos Zt
109     nm1=b((i-a1),2);
110     A(i,nm1)=1;

```

```

111     nm1=0;
112
113     nm2=b((i-a1),3);
114     A(i,nm2)=-1;
115     nm2=0;
116 end
117 for i=(a1+b1+1):(a1+b1*2) % Líneas de Transporte y Trafos Yt1
118     nm=b((i-a1-b1),2);
119     A(i,nm)=-1;
120     nm=0;
121 end
122 for i=(a1+b1*2+1):e % Líneas de Transporte y Trafos Yt2
123     nm=b((i-a1-b1*2),3);
124     A(i,nm)=-1;
125     nm=0;
126 end
127
128 % A Traspuesta
129 At=A';
130
131 %Cálculo Ybus
132
133 Ybus=At*y*A
134
135
136 % Dimensión de Ybus
137 [n1,n2]=size(Ybus);
138
139 G=[real(Ybus)];
140 B=[imag(Ybus)];
141
142
143
144 % DESARROLLO FLF NR
145
146 % Datos de los buses
147
148 if NB==3
149     if QLIM==0
150         filename2 = 'Datos Buses_n3_ConQlim.xlsx';
151     else
152         filename2 = 'Datos Buses_n3_SinQlim.xlsx';
153     end
154     [Dx]=xlsread(filename2,'A4:J6');
155 elseif NB==14
156     if QLIM==0
157         filename2 = 'Datos Buses_n14_ConQlim.xlsx';
158     else
159         filename2 = 'Datos Buses_n14_SinQlim.xlsx';
160     end
161     [Dx]=xlsread(filename2,'A4:J17');
162 else
163     if QLIM==0
164         filename2 = 'Datos Buses_n30_ConQlim.xlsx';
165     else
166         filename2 = 'Datos Buses_n30_SinQlim.xlsx';

```

```
167     end
168     [Dx]=xlsread(filename2,'A4:J33');
169 end
170
171 Di=[Dx'];
172
173 [n,info]=size(Dx); % n° total de buses
174
175 % 2 - V
176
177 Vi=[ones(1,n)];
178
179 for i=1:n
180     Vi(i)=Di(2,i);
181 end
182
183 % 3 - delta
184
185 deltai=[ones(1,n)];
186
187 for i=1:n
188     deltai(i)=Di(3,i);
189 end
190
191 % 4 - PG
192
193 PGi=[ones(1,n)];
194
195 for i=1:n
196     PGi(i)=Di(4,i)/Sb;
197 end
198
199 % 5 - QG
200
201 QGi=[ones(1,n)];
202
203 for i=1:n
204     QGi(i)=Di(5,i)/Sb;
205 end
206
207 % 6 - PD
208
209 PDi=[ones(1,n)];
210
211 for i=1:n
212     PDi(i)=Di(6,i)/Sb;
213 end
214
215 % 7 - QD
216
217 QDi=[ones(1,n)];
218
219 for i=1:n
220     QDi(i)=Di(7,i)/Sb;
221 end
222
```

```

223 % 8 - Qmin
224
225 Qmini=[ones(1,n)];
226
227 for i=1:n
228     Qmini(i)=Di(8,i)/Sb;
229 end
230
231 % 9 - Qmax
232
233 Qmaxi=[ones(1,n)];
234
235 for i=1:n
236     Qmaxi(i)=Di(9,i)/Sb;
237 end
238
239 % * - p
240
241 P=[ones(1,n)];
242
243 for i=1:n
244     P(i)=PGi(i)-PDi(i);
245 end
246
247 % * - Q
248
249 Q=[ones(1,n)];
250
251 for i=1:n
252     Q(i)=QGi(i)-QDi(i);
253 end
254
255
256 % Contabilización Cantidad de Buses
257
258 r=0; % n° de buses PV
259 for i=2:n
260     if Di(10,i)==2
261         r=r+1;
262     else
263         r=r+0;
264     end
265 end
266
267 q=n-r-1; % n° de buses PQ
268
269
270 % Bus 1: Slack
271 Vlef=Vi(1);
272 delta1=deltai(1);
273
274
275 % Bucle y Resultados NEWTON-RAPHSON:
276
277 iter=0;
278 x=[delta1 Vi];

```



```

279 V=[Vi];
280 delta=[deltai];
281 error=10;
282 x_all_NR=[iter x];
283 error_all_NR=[iter error zeros(1,n*2)];
284
285 while error>=1e-12 && iter<100
286     x_old=x;
287     delta_old=[x_old(1:n)];
288     V_old=[x_old((n+1):2*n)];
289
290     Pc=[zeros(1,n)];
291     Qc=[zeros(1,n)];
292     fp=[zeros(n-1,1)];
293     fq=[zeros(n-1-r,1)];
294     cont1=0;
295     Dn=[Di(10,:)];
296     Qn=[Q];
297     rn=r;
298     qn=q;
299     for i=2:n
300         % Matriz fp y fq - FX
301         % P Calculadas
302         s1=0;
303         for k=2:n
304             s1=s1+V_old(k)*(G(i,k)*cos(delta_old(i)-delta_old(k))+B(i,k)*sin(
(delta_old(i)-delta_old(k)));
305         end
306         Pc(i)=V_old(i)*(V1ef*(G(i,1)*cos(delta_old(i)-delta1)+B(i,1)*sin(delta_old(
(i)-delta1))+s1);
307
308         fp(i-1,1)=P(i)-Pc(i);
309
310
311         % Q Calculadas
312
313         s2=0;
314         for k=2:n
315             s2=s2+V_old(k)*(G(i,k)*sin(delta_old(i)-delta_old(k))-B(i,k)*cos(
(delta_old(i)-delta_old(k)));
316         end
317         Qc(i)=V_old(i)*(V1ef*(G(i,1)*sin(delta_old(i)-delta1)-B(i,1)*cos(delta_old(
(i)-delta1))+s2);
318
319         if Dn(i)==2 % BUSES PV
320             if Qc(i)>=Qmaxi(i)
321                 Dn(i)=3;
322                 rn=rn-1;
323                 qn=qn+1;
324                 Qn(i)=Qmaxi(i);
325             elseif Qc(i)<=Qmini(i)
326                 Dn(i)=3;
327                 rn=rn-1;
328                 qn=qn+1;
329                 Qn(i)=Qmini(i);
330             else

```

```

331         end
332     end
333
334
335     if Dn(i)==3 % BUSES PQ
336         cont1=cont1+1;
337         fq(cont1,1)=Qn(i)-Qc(i);
338     else
339     end
340 end
341
342 FX=[fp;fq];
343 % Matriz Jacobiana - J
344 % Ecuaciones de Matriz
345
346 % Matriz H
347
348 H=[zeros(n-1,n-1)];
349
350 for k=2:n
351     for j=2:n
352         if k==j
353             H(k-1,j-1)=-Qc(k)-B(k,j)*V_old(k)^2;
354         else
355             H(k-1,j-1)=V_old(k)*V_old(j)*(G(k,j)*sin(delta_old(k)-delta_old
356 (j))-B(k,j)*cos(delta_old(k)-delta_old(j)));
357         end
358     end
359 end
360
361 % Matriz N
362
363 N=[zeros(n-1,qn)];
364 t1=0;
365 for k=2:n
366     if Dn(k)==3 % BUSES PQ
367         t1=t1+1;
368         t2=0;
369         for j=2:n
370             t2=t2+1;
371             if k==j
372                 N(t2,t1)=Pc(k)+G(k,j)*V_old(k)^2;
373             else
374                 N(t2,t1)=V_old(j)*V_old(k)*(G(j,k)*cos(delta_old(j)-delta_old
375 (k))+B(j,k)*sin(delta_old(j)-delta_old(k)));
376             end
377         end
378     end
379 end
380
381 % Matriz M
382
383 M=[zeros(qn,n-1)];
384 t3=0;

```

```

385     for k=2:n
386         if Dn(k)==3 % BUSES PQ
387             t3=t3+1;
388             t4=0;
389             for j=2:n
390                 t4=t4+1;
391                 if k==j
392                     M(t3,t4)=Pc(k)-G(k,j)*V_old(k)^2;
393                 else
394                     M(t3,t4)=- (V_old(k)*V_old(j))* (G(k,j)*cos(delta_old(k)-
delta_old(j))+B(k,j)*sin(delta_old(k)-delta_old(j)));
395                 end
396             end
397         else
398         end
399     end
400
401     % Matriz L
402
403     L=[zeros(qn,qn)];
404     t5=0;
405     for k=2:n
406         if Dn(k)==3 % BUSES PQ
407             t5=t5+1;
408             t6=0;
409             for j=2:n
410                 if Dn(j)==3 % BUSES PQ
411                     t6=t6+1;
412                     if k==j
413                         L(t5,t6)=Qc(k)-B(k,j)*V_old(k)^2;
414                     else
415                         L(t5,t6)=V_old(k)*V_old(j)* (G(k,j)*sin(delta_old(k)-
delta_old(j))-B(k,j)*cos(delta_old(k)-delta_old(j)));
416                     end
417                 end
418             end
419         else
420         end
421     end
422
423
424     % Estructuracion J
425
426     J=[H N; M L];
427
428
429     % Resultado & Calculo de Error
430
431     Increm=(J^-1)*FX;
432
433     for t=2:n
434         x(t)=x_old(t)+Increm(t-1);
435     end
436
437     t7=0;
438     for t=n+2:n*2

```

```

439     if Dn(t-n)==3 % BUSES PQ
440         t7=t7+1;
441         x(t)=x_old(t)+Increm(n-1+t7)*x_old(t);
442     else
443         x(t)=x_old(t);
444     end
445 end
446
447
448
449 error=norm(abs(x-x_old),inf);
450 %error=norm(abs(x-x_old),2);
451 errortot=[abs(x-x_old)];
452
453 iter=iter+1;
454
455 x_all_NR=[x_all_NR; iter x];
456 error_all_NR=[error_all_NR; iter error errortot];
457
458 delta=[delta; x(1:n)];
459 V=[V; x((n+1):2*n)];
460
461 end
462
463 iter
464
465
466 %Potencias Inyectadas
467
468 Vf=zeros(1,n);
469 for v=1:n
470     Vf(v)=V(iter,v)*exp(1j*delta(iter,v));
471 end
472
473 S=zeros(1,n);
474
475 for i=1:n
476     sm=0;
477     for j=1:n
478         sm=sm+(Ybus(i,j)*Vf(j));
479     end
480     S(i)=Vf(i)*conj(sm);
481 end
482
483 % Rendimiento de la Red
484
485 i=1;
486 num=0;
487 den=0;
488 while i<=n
489     if real(S(i))<0
490         num=num+abs(real(S(i)));
491     else
492         den=den+abs(real(S(i)));
493     end
494

```

```

495     i=i+1;
496 end
497
498 Rendimiento=100*num/den
499
500 % Pérdidas en la Red
501
502 deltaP=real(sum(S))
503
504
505 % Exportación de Resultados
506
507 if QLIM==0
508     xlswrite(sprintf('Resultados_n%dNR_ConQlim.xlsx',NB), (V(iter,:))', 'Resultados
Resultados Finales', 'B4')
509     xlswrite(sprintf('Resultados_n%dNR_ConQlim.xlsx',NB), (delta(iter,:))*
(180/pi))', 'Resultados Finales', 'C4')
510     xlswrite(sprintf('Resultados_n%dNR_ConQlim.xlsx',NB), real(S)', 'Resultados
Resultados Finales', 'D4')
511     xlswrite(sprintf('Resultados_n%dNR_ConQlim.xlsx',NB), imag(S)', 'Resultados
Resultados Finales', 'E4')
512
513     xlswrite(sprintf('Resultados_n%dNR_ConQlim.xlsx',NB), (V)', 'Vbus', 'A2')
514     xlswrite(sprintf('Resultados_n%dNR_ConQlim.xlsx',NB), (x_all_NR(:,
1))', 'Vbus', 'A1')
515     xlswrite(sprintf('Resultados_n%dNR_ConQlim.xlsx',NB), (delta*(180/pi))', 'delta
Vbus', 'A2')
516     xlswrite(sprintf('Resultados_n%dNR_ConQlim.xlsx',NB), (x_all_NR(:,1))', 'delta
Vbus', 'A1')
517     xlswrite(sprintf('Resultados_n%dNR_ConQlim.xlsx',NB), real(S)', 'Pinj', 'A2')
518     xlswrite(sprintf('Resultados_n%dNR_ConQlim.xlsx',NB), imag(S)', 'Qinj', 'A2')
519     xlswrite(sprintf('Resultados_n%dNR_ConQlim.xlsx',NB),
error_all_NR, 'Errores', 'A2')
520
521     fprintf('END (Mirar archivo: Resultados_n%dNR_ConQlim.xlsx)',NB)
522
523 else
524     xlswrite(sprintf('Resultados_n%dNR_SinQlim.xlsx',NB), (V(iter,:))', 'Resultados
Resultados Finales', 'B4')
525     xlswrite(sprintf('Resultados_n%dNR_SinQlim.xlsx',NB), (delta(iter,:))*
(180/pi))', 'Resultados Finales', 'C4')
526     xlswrite(sprintf('Resultados_n%dNR_SinQlim.xlsx',NB), real(S)', 'Resultados
Resultados Finales', 'D4')
527     xlswrite(sprintf('Resultados_n%dNR_SinQlim.xlsx',NB), imag(S)', 'Resultados
Resultados Finales', 'E4')
528
529     xlswrite(sprintf('Resultados_n%dNR_SinQlim.xlsx',NB), (V)', 'Vbus', 'A2')
530     xlswrite(sprintf('Resultados_n%dNR_SinQlim.xlsx',NB), (x_all_NR(:,
1))', 'Vbus', 'A1')
531     xlswrite(sprintf('Resultados_n%dNR_SinQlim.xlsx',NB), (delta*(180/pi))', 'delta
Vbus', 'A2')
532     xlswrite(sprintf('Resultados_n%dNR_SinQlim.xlsx',NB), (x_all_NR(:,1))', 'delta
Vbus', 'A1')
533     xlswrite(sprintf('Resultados_n%dNR_SinQlim.xlsx',NB), real(S)', 'Pinj', 'A2')
534     xlswrite(sprintf('Resultados_n%dNR_SinQlim.xlsx',NB), imag(S)', 'Qinj', 'A2')
535     xlswrite(sprintf('Resultados_n%dNR_SinQlim.xlsx',NB),

```

```
error_all_NR,'Errores','A2')
536
537     fprintf('END (Mirar archivo: Resultados_n%dNR_SinQlim.xlsx)',NB)
538
539 end
540
541
542
543 end
544
545
546
```

Anexo C. Resolución del flujo armónico de cargas (HLF) mediante el método de la penetración de armónicos (HP)



C1. Código en *Matlab* para resolver el FLFm (de la HP) la red IEEE 14-buses modificada mediante Newton-Raphson

FLFm_14buses_NR_CartielArasa.m

1 of 9

```

1 function FLFm_14buses_NR_CartielArasa
2
3 clear all
4 close all
5 clc
6
7 disp(['Resolución del Problema de Flujo de Cargas Fundamental MODIFICADO en la Red
IEEE 14-buses modificada mediante NEWTON-RAPHSON:'])
8 disp([' ']);
9 disp(['--PASO 1 del proceso de la Harmonic Penetration del Harmonic Load Flow--'])
10 disp([' ']);
11
12 Sb=100; %MVA
13
14 h=1;
15
16 % CÁLCULO DE LA YBUS
17
18 filename1 = 'Datos Lineas_n14m.xlsx';
19 [a]=xlsread(filename1,'A26:G32');
20 [b]=xlsread(filename1,'A4:G25');
21
22 [a1,a2]=size(a);
23 [b1,b2]=size(b);
24
25 e=a1+3*b1; % e => Numero de Impedancias
26 nod=a1; % a1 => Numero de Nodos
27
28 % Matriz y
29
30 ax=0; %Parámetro a transformadores
31 y0=zeros(e,1);
32
33 for i=1:a1 % Admitancias Shunt Filtros y Condensadores
34     y0(i,1)=1/(a(i,4)+1j*(h*a(i,5)-1/(h*a(i,6))));
35 end
36 for i=(a1+1):(a1+b1) % Líneas de Transporte y Trafos Zt
37     if b((i-a1),7)==0
38         y0(i,1)=1/(b((i-a1),4)+1j*h*b((i-a1),5));
39     else
40         ax=b((i-a1),7);
41         y0(i,1)=1/(b((i-a1),4)+1j*h*b((i-a1),5))*(1/ax);
42     end
43 end
44 for i=(a1+b1+1):(a1+b1*2) % Líneas de Transporte y Trafos Yt1
45     if b((i-a1-b1),7)==0
46         y0(i,1)=1j*h*b((i-a1-b1),6);
47     else
48         ax=b((i-a1-b1),7);
49         y0(i,1)=(1/(b((i-a1-b1),4)+1j*h*b((i-a1-b1),5)))*(ax-1)/ax);
50     end
51 end
52 for i=(a1+b1*2+1):e % Líneas de Transporte y Trafos Yt2
53     if b((i-a1-b1*2),7)==0
54         y0(i,1)=1j*h*b((i-a1-b1*2),6);
55     else

```



```

56         ax=b((i-a1-b1*2),7);
57         y0(i,1)=(1/(b((i-a1-b1*2),4)+1j*h*b((i-a1-b1*2),5)))*((1-ax)/(ax^2));
58     end
59 end
60
61
62 y = [zeros(e,e)];
63 for k = 1:e
64     y(k,k)=y0(k,1);
65 end
66
67
68 % Matriz A
69
70 A=[zeros(e,nod)];
71 nm=0;
72 nm1=0;
73 nm2=0;
74
75 for i=1:a1 % Admitancias Shunt Filtros y Condensadores
76     nm=a(i,2);
77     A(i,nm)=-1;
78     nm=0;
79 end
80 for i=(a1+1):(a1+b1) % Líneas de Transporte y Trafos Zt
81     nm1=b((i-a1),2);
82     A(i,nm1)=1;
83     nm1=0;
84
85     nm2=b((i-a1),3);
86     A(i,nm2)=-1;
87     nm2=0;
88 end
89 for i=(a1+b1+1):(a1+b1*2) % Líneas de Transporte y Trafos Yt1
90     nm=b((i-a1-b1),2);
91     A(i,nm)=-1;
92     nm=0;
93 end
94 for i=(a1+b1*2+1):e % Líneas de Transporte y Trafos Yt2
95     nm=b((i-a1-b1*2),3);
96     A(i,nm)=-1;
97     nm=0;
98 end
99
100 % A Traspuesta
101
102 At=A';
103
104 % Cálculo Ybus
105
106 Ybus=At*y*A
107
108 % Dimensión de Ybus
109
110 [n1,n2]=size(Ybus);
111

```

```
112 G=[real(Ybus)];
113 B=[imag(Ybus)];
114
115
116
117 % DESARROLLO FLFm NR
118
119 filename2 = 'Datos Buses_n14m.xlsx';
120 [Dx]=xlsread(filename2,'A4:J19');
121
122 Di=[Dx'];
123
124 [n,info]=size(Dx); % n° total de buses
125
126 % 2 - V
127
128 Vi=[ones(1,n)];
129
130 for i=1:n
131     Vi(i)=Di(2,i);
132 end
133
134 % 3 - delta
135
136 deltai=[ones(1,n)];
137
138 for i=1:n
139     deltai(i)=Di(3,i);
140 end
141
142 % 4 - PG
143
144 PGi=[ones(1,n)];
145
146 for i=1:n
147     PGi(i)=Di(4,i)/Sb;
148 end
149
150 % 5 - QG
151
152 QGi=[ones(1,n)];
153
154 for i=1:n
155     QGi(i)=Di(5,i)/Sb;
156 end
157
158 % 6 - PD
159
160 PDi=[ones(1,n)];
161
162 for i=1:n
163     PDi(i)=Di(6,i)/Sb;
164 end
165
166 % 7 - QD
167
```

```
168 QDi=[ones(1,n)];
169
170 for i=1:n
171     QDi(i)=Di(7,i)/Sb;
172 end
173
174 % 8 - Qmin
175
176 Qmini=[ones(1,n)];
177
178 for i=1:n
179     Qmini(i)=Di(8,i)/Sb;
180 end
181
182 % 9 - Qmax
183
184 Qmaxi=[ones(1,n)];
185
186 for i=1:n
187     Qmaxi(i)=Di(9,i)/Sb;
188 end
189
190 % * - P
191
192 P=[ones(1,n)];
193
194 for i=1:n
195     P(i)=PGi(i)-PDi(i);
196 end
197
198 % * - Q
199
200 Q=[ones(1,n)];
201
202 for i=1:n
203     Q(i)=QGi(i)-QDi(i);
204 end
205
206
207 % Contabilización Cantidad de Buses
208
209 r=0; % n° de buses PV
210 for i=2:n
211     if Di(10,i)==2
212         r=r+1;
213     else
214         r=r+0;
215     end
216 end
217
218 q=n-r-1; % n° de buses PQ
219
220
221 % Bus 1: Slack
222 Vlef=Vi(1);
223 delta1=deltai(1);
```

```

224
225
226 % Bucle y Resultados NEWTON-RAPHSON:
227
228 iter=0;
229 x=[deltai Vi];
230 V=[Vi];
231 delta=[deltai];
232 error=10;
233 x_all_NR=[iter x];
234 error_all_NR=[iter error zeros(1,n*2)];
235
236 while error>=1e-12 && iter<100
237     x_old=x;
238     delta_old=[x_old(1:n)];
239     V_old=[x_old((n+1):2*n)];
240
241     Pc=zeros(1,n);
242     Qc=zeros(1,n);
243     fp=zeros(n-1,1);
244     fq=zeros(n-1-r,1);
245     contl=0;
246     Dn=[Di(10,:)];
247     Qn=[Q];
248     rn=r;
249     qn=q;
250     for i=2:n
251         % Matriz fp y fq - FX
252         % P Calculadas
253         s1=0;
254         for k=2:n
255             s1=s1+V_old(k)*(G(i,k)*cos(delta_old(i)-delta_old(k))+B(i,k)*sin
(delta_old(i)-delta_old(k)));
256         end
257         Pc(i)=V_old(i)*(V1ef*(G(i,1)*cos(delta_old(i)-deltal)+B(i,1)*sin(delta_old
(i)-deltal))+s1);
258
259         fp(i-1,1)=P(i)-Pc(i);
260
261         % Q Calculadas
262
263         s2=0;
264         for k=2:n
265             s2=s2+V_old(k)*(G(i,k)*sin(delta_old(i)-delta_old(k))-B(i,k)*cos
(delta_old(i)-delta_old(k)));
266         end
267         Qc(i)=V_old(i)*(V1ef*(G(i,1)*sin(delta_old(i)-deltal)-B(i,1)*cos(delta_old
(i)-deltal))+s2);
268
269
270         if Dn(i)==2 % BUSES PV
271             if Qc(i)>=Qmaxi(i)
272                 Dn(i)=3;
273                 rn=rn-1;
274                 qn=qn+1;
275                 Qn(i)=Qmaxi(i);

```

```

276         elseif Qc(i)<=Qmini(i)
277             Dn(i)=3;
278             rn=rn-1;
279             qn=qn+1;
280             Qn(i)=Qmini(i);
281         else
282             end
283     end
284
285
286     if Dn(i)==3 % BUSES PQ
287         cont1=cont1+1;
288         fq(cont1,1)=Qn(i)-Qc(i);
289     else
290         end
291 end
292
293 FX=[fp;fq];
294 % Matriz Jacobiana - J
295 % Ecuaciones de Matriz
296
297 % Matriz H
298
299 H=[zeros(n-1,n-1)];
300
301 for k=2:n
302     for j=2:n
303         if k==j
304             H(k-1,j-1)=-Qc(k)-B(k,j)*V_old(k)^2;
305         else
306             H(k-1,j-1)=V_old(k)*V_old(j)*(G(k,j)*sin(delta_old(k)-delta_old
307 (j))-B(k,j)*cos(delta_old(k)-delta_old(j)));
308         end
309     end
310 end
311
312 % Matriz N
313
314 N=[zeros(n-1,qn)];
315 t1=0;
316 for k=2:n
317     if Dn(k)==3 % BUSES PQ
318         t1=t1+1;
319         t2=0;
320         for j=2:n
321             t2=t2+1;
322             if k==j
323                 N(t2,t1)=Pc(k)+G(k,j)*V_old(k)^2;
324             else
325                 N(t2,t1)=V_old(j)*V_old(k)*(G(j,k)*cos(delta_old(j)-delta_old
326 (k))+B(j,k)*sin(delta_old(j)-delta_old(k)));
327             end
328         end
329     else
330         end
331 end

```

```

330     end
331
332     % Matriz M
333
334     M=[zeros(qn,n-1)];
335     t3=0;
336     for k=2:n
337         if Dn(k)==3 % BUSES PQ
338             t3=t3+1;
339             t4=0;
340             for j=2:n
341                 t4=t4+1;
342                 if k==j
343                     M(t3,t4)=Pc(k)-G(k,j)*V_old(k)^2;
344                 else
345                     M(t3,t4)=- (V_old(k)*V_old(j)*(G(k,j)*cos(delta_old(k)-
delta_old(j))+B(k,j)*sin(delta_old(k)-delta_old(j))));
346                 end
347             end
348         else
349             end
350     end
351
352     % Matriz L
353
354     L=[zeros(qn,qn)];
355     t5=0;
356     for k=2:n
357         if Dn(k)==3 % BUSES PQ
358             t5=t5+1;
359             t6=0;
360             for j=2:n
361                 if Dn(j)==3 % BUSES PQ
362                     t6=t6+1;
363                     if k==j
364                         L(t5,t6)=Qc(k)-B(k,j)*V_old(k)^2;
365                     else
366                         L(t5,t6)=V_old(k)*V_old(j)*(G(k,j)*sin(delta_old(k)-
delta_old(j))-B(k,j)*cos(delta_old(k)-delta_old(j)));
367                     end
368                 end
369             end
370         else
371             end
372     end
373
374
375     % Estructuracion J
376
377     J=[H N; M L];
378
379
380     % Resultado & Calculo de Error
381
382     Increm=(J^-1)*FX;
383

```

```

384     for t=2:n
385         x(t)=x_old(t)+Increm(t-1);
386     end
387
388     t7=0;
389     for t=n+2:n*2
390         if Dn(t-n)==3 % BUSES PQ
391             t7=t7+1;
392             x(t)=x_old(t)+Increm(n-1+t7)*x_old(t);
393         else
394             x(t)=x_old(t);
395         end
396     end
397
398
399
400     error=norm(abs(x-x_old),inf);
401     %error=norm(abs(x-x_old),2);
402     errortot=[abs(x-x_old)];
403
404     iter=iter+1;
405
406     x_all_NR=[x_all_NR; iter x];
407     error_all_NR=[error_all_NR; iter error errortot];
408
409     delta=[delta; x(1:n)];
410     V=[V; x((n+1):2*n)];
411
412 end
413
414 iter
415
416
417 %Potencias Inyectadas
418
419 Vf=zeros(1,n);
420 for v=1:n
421     Vf(v)=V(iter,v)*exp(1j*delta(iter,v));
422 end
423
424 S=zeros(1,n);
425
426 for i=1:n
427     sm=0;
428     for j=1:n
429         sm=sm+(Ybus(i,j)*Vf(j));
430     end
431     S(i)=Vf(i)*conj(sm);
432 end
433
434
435 % Rendimiento de la Red
436
437 i=1;
438 num=0;
439 den=0;

```

```

440 while i<=n
441     if real(S(i))<0
442         num=num+abs(real(S(i)));
443     else
444         den=den+abs(real(S(i)));
445     end
446
447     i=i+1;
448 end
449
450 Rendimiento=100*num/den
451
452
453 % Pérdidas en la Red
454
455 deltaP=real(sum(S))
456
457 % Cálculo Ibus
458
459 Ibus=Ybus*Vf';
460
461 % Exportación Resultados
462
463 xlswrite('Resultados_n14NR_FLFm.xlsx', (V(iter,:))', 'Resultados Finales', 'B4')
464 xlswrite('Resultados_n14NR_FLFm.xlsx', (delta(iter,:)*(180/pi))', 'Resultados
Resultados Finales', 'C4')
465 xlswrite('Resultados_n14NR_FLFm.xlsx', real(S)', 'Resultados Finales', 'D4')
466 xlswrite('Resultados_n14NR_FLFm.xlsx', imag(S)', 'Resultados Finales', 'E4')
467
468 xlswrite('Resultados_n14NR_FLFm.xlsx', (V)', 'Vbus', 'A2')
469 xlswrite('Resultados_n14NR_FLFm.xlsx', (x_all_NR(:,1))', 'Vbus', 'A1')
470 xlswrite('Resultados_n14NR_FLFm.xlsx', (delta*(180/pi))', 'delta Vbus', 'A2')
471 xlswrite('Resultados_n14NR_FLFm.xlsx', (x_all_NR(:,1))', 'delta Vbus', 'A1')
472 xlswrite('Resultados_n14NR_FLFm.xlsx', real(S)', 'Pinj', 'A2')
473 xlswrite('Resultados_n14NR_FLFm.xlsx', imag(S)', 'Qinj', 'A2')
474 xlswrite('Resultados_n14NR_FLFm.xlsx', abs(Ibus)', 'Ibus', 'A2')
475 xlswrite('Resultados_n14NR_FLFm.xlsx', angle(Ibus)*(180/pi)', 'Ibus', 'B2')
476 xlswrite('Resultados_n14NR_FLFm.xlsx', error_all_NR, 'Errores', 'A2')
477
478
479
480
481 disp(['END (Mirar archivo: Resultados_n14NR_FLFm.xlsx)'])
482 end

```


C2. Código en *Matlab* para resolver el VN (de la HP) de la red IEEE 14-buses modificada

VN_14buses_HP_CartielArasa.m

1 of 4

```

1 function VN_14buses_HP_CartielArasa
2
3 clear all
4 close all
5 clc
6
7 disp(['Resolución de la Penetración Armónica en la Red IEEE 14-buses modificada
mediante VN:'])
8 disp([' ']);
9 disp(['--PASO 2 del proceso de la Harmonic Penetration del Harmonic Load Flow--']);
10 disp([' ']);
11
12 Sb=100; %MVA
13
14
15 % Datos para la Ybus_h
16
17 filename3 = 'Datos Lineas_n14m.xlsx';
18 [a]=xlsread(filename3,'A26:G32');
19 [b]=xlsread(filename3,'A4:G25');
20 [c]=xlsread(filename3,'A33:G35');
21 [d]=xlsread(filename3,'A36:G45');
22
23 [a1,a2]=size(a);
24 [b1,b2]=size(b);
25 [c1,c2]=size(c);
26 [d1,d2]=size(d);
27
28 e=a1+3*b1+c1+d1; % e => Numero de Impedancias
29
30
31 % Valores V y delta del FLFm a 50hz (h=1)
32
33 filename0 = 'Resultados_n14NR_FLFm.xlsx';
34 [VdPQ]=xlsread(filename0,'Resultados Finales','A4:E19');
35
36 V50=[VdPQ(:,2)];
37 delta50=[VdPQ(:,3)*(pi/180)];
38 P50=[VdPQ(:,4)];
39 Q50=[VdPQ(:,5)];
40
41 filename1 = 'Datos Buses_n14m.xlsx';
42 [PQ]=xlsread(filename1,'A4:J19');
43 Pload50=[PQ(:,6)/Sb];
44 Qload50=[PQ(:,7)/Sb];
45
46 xlswrite('Resultados_HP_Vh.xlsx',V50,'h1','B2')
47 xlswrite('Resultados_HP_Vh.xlsx',delta50*(180/pi),'h1','C2')
48
49 [nod,nodnul]=size(V50);
50
51 % Valores I y phi del FLFm a 50hz (h=1)
52
53 I50c=[zeros(nod,1)];
54 for i=1:nod
55     I50c(i)=conj((P50(i)+j*Q50(i))/(V50(i)*exp(1j*delta50(i))));

```

```

56 end
57 I50=[abs(I50c)];
58 fi50=[angle(I50c)];
59
60 % Datos Harmonic Source
61
62 filename4='Datos Harmonic Source_n14m.xlsx';
63 [HS]=xlsread(filename4,'A5:E14');
64
65
66 % Formación matriz Ybush y bucle por harmonico
67
68 cont=1;
69 for h=[5 7 11 13 17 19 23 25 29]
70     cont=cont+1;
71
72     % Matriz y
73
74     ax=0; % Parámetro a transformadores
75     pos=0; % Determinar que numero de bus se está
76     y0=[zeros(e,1)];
77
78     for i=1:a1 % Admitancias Shunt Filtros y Condensadores
79         y0(i,1)=1/(a(i,4)+1j*(h*a(i,5)-1/(h*a(i,6))));
80     end
81     for i=(a1+1):(a1+b1) % Líneas de Transporte y Trafos Zt
82         y0(i,1)=1/(b((i-a1),4)+1j*h*b((i-a1),5));
83     end
84     for i=(a1+b1+1):(a1+b1*2) % Líneas de Transporte y Trafos Yt1
85         y0(i,1)=1j*h*b((i-a1-b1),6);
86     end
87     for i=(a1+b1*2+1):(a1+b1*3) % Líneas de Transporte y Trafos Yt2
88         y0(i,1)=1j*h*b((i-a1-b1*2),6);
89     end
90     for i=(a1+b1*3+1):(a1+b1*3+c1) % Admitancias shunt Generadores
91         y0(i,1)=1/(1j*h*c((i-a1-b1*3),5));
92     end
93     for i=(a1+b1*3+c1+1):e % Admitancias shunt Cargas
94         pos=d((i-a1-b1*3-c1),2);
95         if Pload50(pos)==0 && Qload50(pos)==0
96             y0(i,1)=0+1j*0;
97         elseif Pload50(pos)==0 && Qload50(pos)~=0
98             Pload50=1e-15;
99             Rc=(V50(pos)^2)/Pload50;
100            Xsc=0.073*h*Rc;
101            tgfi=Qload50(pos)/Pload50;
102            Xpc=(h*Rc)/(6.7*tgfi-0.74);
103            y0(i,1)=1/(Rc+1j*Xsc)+1/(1j*Xpc);
104         else
105             Rc=(V50(pos)^2)/Pload50(pos);
106             Xsc=0.073*h*Rc;
107             tgfi=Qload50(pos)/Pload50(pos);
108             Xpc=(h*Rc)/(6.7*tgfi-0.74);
109             y0(i,1)=1/(Rc+1j*Xsc)+1/(1j*Xpc);
110         end
111     end

```

```

112
113     y = [zeros(e,e)];
114     for k = 1:e
115         y(k,k)=y0(k,1);
116     end
117
118     % Matriz A
119
120     A=[zeros(e,nod)];
121     nm=0;
122     nm1=0;
123     nm2=0;
124     for i=1:a1 % Admitancias Shunt Filtros y Condensadores
125         nm=a(i,2);
126         A(i,nm)=-1;
127         nm=0;
128     end
129     for i=(a1+1):(a1+b1) % Líneas de Transporte y Trafos Zt
130         nm1=b((i-a1),2);
131         A(i,nm1)=1;
132         nm1=0;
133
134         nm2=b((i-a1),3);
135         A(i,nm2)=-1;
136         nm2=0;
137     end
138     for i=(a1+b1+1):(a1+b1*2) % Líneas de Transporte y Trafos Yt1
139         nm=b((i-a1-b1),2);
140         A(i,nm)=-1;
141         nm=0;
142     end
143     for i=(a1+b1*2+1):(a1+b1*3) % Líneas de Transporte y Trafos Yt2
144         nm=b((i-a1-b1*2),3);
145         A(i,nm)=-1;
146         nm=0;
147     end
148     for i=(a1+b1*3+1):(a1+b1*3+c1) % Admitancias shunt Generadores
149         nm=c((i-a1-b1*3),2);
150         A(i,nm)=-1;
151         nm=0;
152     end
153     for i=(a1+b1*3+c1+1):e % Admitancias shunt Cargas
154         nm=d((i-a1-b1*3-c1),2);
155         A(i,nm)=-1;
156         nm=0;
157     end
158
159     % A Traspuesta
160
161     At=A';
162
163     % Cálculo Ybush
164
165     Ybush=At*y*A;
166
167

```

```

168
169 % Calculo Ih inyectada por cargas no lineales para h>1
170
171 Ihm=[zeros(nod,1)];
172 fih=[zeros(nod,1)];
173 Ih=[zeros(nod,1)];
174 for i=1:nod
175     if i==8
176         Ihm(i)=I50(i)*HS(cont,4)/HS(1,4);
177         fih(i)=HS(cont,5)*(pi/180)+h*(fi50(i)-HS(1,5)*(pi/180));
178     elseif i==15
179         Ihm(i)=I50(i)*HS(cont,2)/HS(1,2);
180         fih(i)=HS(cont,3)*(pi/180)+h*(fi50(i)-HS(1,3)*(pi/180));
181     elseif i==16
182         if h==5
183             Ihm(i)=I50(i)*HS(cont,2)/HS(1,2);
184             fih(i)=(HS(cont,3)*(pi/180)+pi)+h*(fi50(i)-HS(1,3)*(pi/180));
185         elseif h==7
186             Ihm(i)=I50(i)*HS(cont,2)/HS(1,2);
187             fih(i)=(HS(cont,3)*(pi/180)-pi)+h*(fi50(i)-HS(1,3)*(pi/180));
188         elseif h==17
189             Ihm(i)=I50(i)*HS(cont,2)/HS(1,2);
190             fih(i)=(HS(cont,3)*(pi/180)-pi)+h*(fi50(i)-HS(1,3)*(pi/180));
191         elseif h==19
192             Ihm(i)=I50(i)*HS(cont,2)/HS(1,2);
193             fih(i)=(HS(cont,3)*(pi/180)-pi)+h*(fi50(i)-HS(1,3)*(pi/180));
194         elseif h==29
195             Ihm(i)=I50(i)*HS(cont,2)/HS(1,2);
196             fih(i)=(HS(cont,3)*(pi/180)-pi)+h*(fi50(i)-HS(1,3)*(pi/180));
197         else
198             Ihm(i)=I50(i)*HS(cont,2)/HS(1,2);
199             fih(i)=HS(cont,3)*(pi/180)+h*(fi50(i)-HS(1,3)*(pi/180));
200         end
201     else
202         Ihm(i)=0;
203     end
204     Ih(i)=Ihm(i)*exp(1j*fih(i));
205 end
206
207 % Calculo Vh
208
209 Vh=inv(Ybush)*Ih;
210
211 % Exportación Resultados
212
213 xlswrite('Resultados_HP_Vh.xlsx',abs(Vh),sprintf('h%d',h),'B2')
214 xlswrite('Resultados_HP_Vh.xlsx',angle(Vh)*(180/pi),sprintf('h%d',h),'C2')
215 end
216
217 disp(['END (Mirar archivo Resultados_HP_Vh.xlsx)'])
218 end

```

