

Proyecto Fin de Carrera
Grado en Ingeniería de las Tecnologías
Industriales

Análisis de Seguridad en Redes Eléctricas mediante
Factores de Distribución

Autor: Álvaro Marrón Borrego

Tutor: José Luis Martínez Ramos

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

Sevilla, 2022



Proyecto Fin de Grado
Grado en Ingeniería de las Tecnologías Industriales

Análisis de Seguridad en Redes Eléctricas mediante Factores de Distribución

Autor:

Álvaro Marrón Borrego

Tutor:

José Luis Martínez Ramos

Profesor titular

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

Proyecto Fin de Carrera: Análisis de Seguridad en Redes Eléctricas mediante Factores de Distribución

Autor: Álvaro Marrón Borrego

Tutor: José Luis Martínez Ramos

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

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2022

El Secretario del Tribunal

A mi familia

A mis maestros

Resumen

El objeto del presente proyecto es programar una serie de algoritmos que permitan realizar análisis de seguridad N-1 a redes eléctricas. Esto se conseguirá mediante el uso de factores de distribución. La programación de los algoritmos se realizará a través de Matlab.

Los resultados obtenidos mediante el uso de factores de distribución serán comparados con los obtenidos tras realizar el mismo análisis utilizando métodos iterativos.

Por ello, construiremos algoritmos para realizar flujos de cargas mediante Newton-Raphson y *DCLF*. También para analizar contingencias en generadores y contingencias en líneas mediante factores de distribución. Estos resultados se compararán a través de flujos de cargas empleando Newton-Raphson. Además, diseñaremos una interfaz gráfica para automatizar la ejecución de los algoritmos.

Realizaremos estos análisis de seguridad a cuatro redes: *IEEE-14*, *IEEE-39*, *IEEE-118* e *IEEE-300*, cada una más compleja y compuesta por más nudos. Con esto se pretende estudiar las ventajas y las desventajas en cada caso de los algoritmos en los que se usan los factores de distribución frente a los métodos iterativos.

Con la red *IEEE-14* veremos que el error cometido por los factores de distribución se reduce cuando partimos de flujos más exactos, como los calculados mediante Newton-Raphson. Sin embargo, comprobaremos que esto no siempre es posible, bien porque se alcanzan tiempos de ejecución de horas, como es el caso de la red *IEEE-300*, o porque el método no converge, como ocurre con la red *IEEE-118*.

Además, a través del análisis de la red *IEEE-39* compararemos la fiabilidad de los resultados obtenidos mediante factores de distribución para la detección de sobrecargas. Comprobaremos que no todas se detectan satisfactoriamente, debido al error que se comete.

Gracias a los análisis de estas redes obtendremos las principales características que se obtienen de los factores de distribución:

- Bajo coste computacional.
- Tiempos de ejecución del orden de segundos.
- Se puede emplear en todo tipo de redes.
- Errores debidos a la linealización del problema $P - \theta$.
- Problemas en la detección de sobrecargas.

Abstract

The purpose of this project is to program a series of algorithms that allow N-1 security analysis to be carried out on electrical networks. This will be achieved through the use of distribution factors. The programming of the algorithms will be done through Matlab.

The results obtained through the use of distribution factors will be compared with those obtained after carrying out the same analysis using iterative methods.

Therefore, we will build algorithms to perform load flows using Newton-Raphson and *DCLF*. Also to analyze contingencies in generators and contingencies in lines through distribution factors. These results will be compared through load flows using Newton-Raphson. We will also design a graphical interface to automate the execution of the algorithms.

We will perform these security analyzes on four networks: *IEEE-14*, *IEEE-39*, *IEEE-118* and *IEEE-300*, each one more complex and composed of more nodes. This is intended to study the advantages and disadvantages in each case of the algorithms in which distribution factors are used compared to iterative methods.

With the *IEEE-14* network we will see that the error made by the distribution factors is reduced when we start from more exact flows, such as those calculated using Newton-Raphson. However, this is not always possible, either because execution times of hours are reached, as is the case with the *IEEE-300* network, or because the method does not converge, as is the case with the *IEEE-118* network.

In addition, through the analysis of the *IEEE-39* network we will compare the reliability of the results obtained by means of distribution factors for the detection of overloads. We will verify that not all of them are detected satisfactorily, due to the error that is made.

Thanks to the analysis of these networks we will obtain the main characteristics obtained from the distribution factors:

- Low computational cost.
- Execution times on the order of seconds.
- It can be used in all types of networks.
- Errors due to the linearization of the P- θ problem.
- Problems in the detection of overloads.

Índice

Resumen	viii
Abstract	x
Índice	xi
Índice de Tablas	i
Índice de Figuras	i
1 Introducción	1
2 Objeto	2
3 Programación de los algoritmos	3
3.1 <i>Flujo de carga</i>	3
3.1.1 Método de Newton-Raphson	3
3.1.2 Flujo de cargas en continua	4
3.2 <i>Análisis de contingencias</i>	4
3.2.1 Análisis de contingencias en generadores	5
3.2.2 Análisis de contingencias en líneas	6
3.3 <i>Detección de sobrecargas</i>	6
4 Interfaz informática	7
5 Evaluación de los resultados	11
5.1 <i>Red IEEE-14</i>	11
5.2 <i>Red IEEE-39</i>	17
5.3 <i>Red IEEE-118</i>	26
5.4 <i>Red IEEE-300</i>	31
6 Conclusiones	44
Referencias	48

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3-1 Potencias típicas (MW) en líneas eléctricas aéreas.	6
Tabla 5-1 Flujo por las ramas utilizando Newton Raphson y DCLF para red de 14 nudos.	12
Tabla 5-2 Tensiones y potencias nodales utilizando Newton Raphson para red de 14 nudos.	12
Tabla 5-3 Contingencia del generador 2 partiendo de DCLF de la red de 14 nudos.	13
Tabla 5-4 Contingencia del generador 2 partiendo de Newton-Raphson de la red de 14 nudos.	13
Tabla 5-5 Tensiones y potencias nodales contingencia del generador 2 de la red de 14 nudos.	14
Tabla 5-6 Contingencia de 10 líneas de la red de 14 nudos.	15
Tabla 5-7 Contingencia de otras 10 líneas de la red de 14 nudos.	15
Tabla 5-8 Comparativa contingencias líneas 2-3, 2-4, y 2-5 de la red de 14 nudos.	16
Tabla 5-9 Contingencia de la línea 2-3 de la red de 14 nudos.	16
Tabla 5-10 Flujo por las ramas utilizando Newton Raphson y DCLF para red de 39 nudos.	18
Tabla 5-11 Tensiones y potencias nodales utilizando Newton Raphson para red de 39 nudos.	19
Tabla 5-12 Contingencias de los generadores de la red de 39 nudos.	20
Tabla 5-13 Contingencia del generador 30 de la red de 39 nudos.	21
Tabla 5-14 Comparativa contingencias líneas 6-7 y 16-19 de la red de 39 nudos.	23
Tabla 5-15 Comparativa contingencias líneas 6-7 y 16-19 de la red de 39 nudos.	24
Tabla 5-16 Flujos por las líneas para contingencias más relevantes de la red de 118 nudos.	26
Tabla 5-17 Flujo por las ramas utilizando Newton Raphson y DCLF para red de 300 nudos.	31
Tabla 5-18 Tiempos de ejecución de flujos iniciales para red de 300 nudos.	41
Tabla 5-19 Tiempos de ejecución análisis de contingencias en generadores para red de 300 nudos.	42
Tabla 5-20 Tiempos de ejecución análisis de contingencias en ramas para red de 300 nudos.	42
Tabla 6-1 Errores medios cometidos en distintos análisis N-1 para la red IEEE-14.	44
Tabla 6-2 Tiempos de ejecución de distintos análisis N-1 completos (generadores y líneas)	44
Tabla 6-3 Errores medios cometidos en distintos análisis N-1 para la red de 39 nudos.	45
Tabla 6-4 Tiempos de ejecución de flujos iniciales para red de 300 nudos.	46
Tabla 6-5 Tiempos de ejecución de análisis de contingencias para red de 300 nudos.	46
Tabla 6-6 Comparativa errores medios cometidos en distintos análisis para la red <i>IEEE-14</i> y la red <i>IEEE-39</i> .	46

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 4-1. Interfaz gráfica para el análisis N-1.	7
Figura 4-2. Estructura para Excel de datos de entrada de los nudos de la red.	8
Figura 4-3. Estructura para Excel de datos de entrada de las líneas de la red.	8
Figura 4-4. Estructura de datos de salida de flujo de carga inicial con Newton-Raphson.	9
Figura 4-5. Estructura de datos de salida de flujo de carga inicial con <i>DCLF</i> .	9
Figura 4-6. Estructura de datos de salida de análisis de contingencias en generadores.	9
Figura 4-7. Estructura de datos de salida de análisis de contingencias en líneas.	10
Figura 4-8. Estructura de datos de salida de flujos de carga desconectando generadores.	10
Figura 5-1. Esquema de la red IEEE-14.	11
Figura 5-2. Esquema de la red IEEE-39.	17
Figura 5-3. Errores cometidos en contingencia del generador 30 para red de 39 nudos.	22
Figura 5-4. Errores cometidos en contingencia de las líneas 6-7, 16-19, 21-22 y 23-24 para red de 39 nudos.	25
Figura 5-5. Esquema de la red IEEE-118.	26
Figura 5-6. Esquema de la red IEEE-300.	31
Figura 5-7. Errores cometidos en flujos iniciales con DCLF para red de 300 nudos.	41
Figura 5-8. Gráfico circular representativo de los tiempos de ejecución para contingencias en generadores en red de 300 nudos.	43
Figura 5-9 Gráfica circular representativo de los tiempos de ejecución para contingencias en líneas en red de 300 nudos.	43

1 INTRODUCCIÓN

En el sistema eléctrico español, el desarrollo y fortalecimiento de las interconexiones con el resto de sistemas vecinos constituye uno de los retos más importantes a lograr en los próximos años. El desarrollo de nuevas interconexiones resulta indispensable para alcanzar el objetivo vinculante de energías renovables fijado por la Unión Europea para el año 2030. Una mayor interconectividad permite una mayor integración de la generación renovable en los sistemas. Además, fortalece el sistema mejorando la seguridad y la continuidad del suministro eléctrico. [1]

Los transportistas y operadores del sistema eléctrico de una región tienen la responsabilidad de garantizar la continuidad y seguridad del suministro eléctrico y de prestar un servicio eficiente, de calidad y sostenible. Por ello trabajan en el desarrollo de una red eléctrica mallada, robusta y mejor interconectada [2].

Un sistema seguro debe ser entendido como seguro frente a una serie de eventos que condicionan el propio concepto de seguridad del sistema eléctrico. En este sentido, los eventos que se suelen considerar son los siguientes:

- Fallo simple en cualquier elemento del sistema (generador, línea, transformador...), criterio comúnmente conocido como $N-1$.
- Fallo doble simultáneo de dos elementos cualesquiera del sistema eléctrico, criterio conocido como $N-2$.
- Fallo simultáneo de líneas en doble circuito que comparten apoyos en un tramo considerable de su trazado.
- Fallo del mayor generador de una zona y de una de sus líneas de interconexión con el sistema (se utiliza en situaciones especiales).

En estudios de planificación del sistema son de gran utilidad los *análisis de seguridad*, más conocidos como *análisis de contingencias*. Estos se basan en el estudio detallado del sistema ante el fallo de uno o varios elementos. Consiste en realizar múltiples estudios en los cuales se determina el estado de la red tras la pérdida de uno o varios elementos del sistema eléctrico [3].

2 OBJETO

El objeto del presente proyecto es programar una serie de algoritmos que permitan realizar análisis de seguridad N-1 a redes eléctricas mediante el uso de factores de distribución. Para el análisis se tendrán en cuenta contingencias simples en las líneas y en los generadores. Además, vamos a distinguir dos tipos de contingencias en los generadores. En uno de ellos la pérdida de generación será asumida por el *generador slack*¹ y en el otro será asumida por el resto de generadores de la red de forma proporcional a su potencia nominal de generación. Además de los algoritmos para los análisis de contingencias, vamos a programar otros capaces de resolver flujos de cargas mediante dos métodos: flujos de continua y flujos empleando Newton-Raphson.

Todos estos algoritmos serán desarrollados en Matlab. También vamos a programar una interfaz gráfica donde podamos ejecutar los diferentes análisis partiendo de los datos las redes, con el objetivo de automatizar el estudio de las redes y de visualizar correctamente los resultados.

Realizaremos estos análisis de seguridad a distintas redes, cada una más compleja y compuesta por más nudos. Estas redes han sido obtenidas de un repositorio de redes de prueba de la página web de la Universidad de Texas A&M [4]. Este repositorio cuenta con datos de diversas redes. Nosotros vamos a utilizar cuatro de ellas: *IEEE-14*, *IEEE-39*, *IEEE-118* e *IEEE-300*.

Con estos análisis se pretende estudiar las ventajas y las desventajas en cada caso de los algoritmos en los que se usan los factores de distribución frente a los métodos iterativos. Para ello, vamos a comparar los resultados obtenidos con los algoritmos basados en el uso de factores de distribución frente a *flujos de carga*² utilizando el método de *Newton-Raphson*.

El objetivo del estudio de estas redes es analizar los errores que se cometen al emplear factores de distribución y comprobar hasta qué punto la linealización del subproblema $P - \theta$ nos permite obtener resultados fiables. También se pretende comparar además del error que se comete, los diferentes tiempos de ejecución que emplea cada método y los diferentes costes computacionales que requieren.

¹ Nudo que en el análisis de flujo de cargas de un sistema eléctrico equilibra la generación con la demanda de potencia activa.

² El problema del flujo de cargas consiste en obtener las tensiones en todos los nudos y los flujos de potencia por todos los elementos de un sistema de transporte o distribución, es decir, en determinar las condiciones de operación en régimen permanente de un sistema de potencia.

3 PROGRAMACIÓN DE LOS ALGORITMOS

Los algoritmos necesarios para nuestro análisis se clasifican en dos grupos: los algoritmos relacionados con los flujos de cargas y los relacionados con el análisis de contingencias. A través de los flujos de cargas y conociendo los datos de una red seremos capaces de obtener el estado de las tensiones en los nudos y de los flujos por las ramas en el régimen permanente. Desarrollaremos un método más exacto y otro menos exacto, pero más rápido. Respecto a los algoritmos para el análisis de contingencias utilizaremos el análisis mediante factores de distribución, para el caso de contingencias en los generadores y en las líneas. Todos estos algoritmos serán desarrollados a partir de las ecuaciones estudiadas en el libro *Análisis y operación de sistemas de energía eléctrica* [3].

3.1 Flujo de carga

En primer lugar, antes de realizar el análisis de seguridad N-1, es interesante conocer el estado inicial de la red. Para esto vamos a llevar a cabo un flujo de cargas. A partir de los datos de consumo en cada nudo y la potencia generada seremos capaces de obtener las tensiones en los nudos y los flujos de potencia por las líneas y los transformadores.

Históricamente, existen diversos métodos matemáticos capaces de ayudarnos a resolver este problema. En nuestro proyecto vamos a utilizar dos: el método de Newton-Raphson y el flujo de cargas en continua (*DCLF*). Ambos métodos nos serán de gran ayuda para conocer el estado de la red en diferentes circunstancias. Además, el método de Newton-Raphson también lo utilizaremos para comparar los resultados de los análisis de seguridad con un flujo de cargas donde se tengan en cuenta los eventos.

3.1.1 Método de Newton-Raphson

Este método se basa en el error del balance de potencia en cada nudo. Las funciones o *residuos* a anular son la diferencia entre los valores de potencia calculados y los especificados, es decir:

$$\Delta P_i = P_i^{esp} - V_i \sum_{j=1}^n V_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) \quad (3-1)$$
$$i = 1, 2, \dots, n - 1$$

$$\Delta Q_i = Q_i^{esp} - V_i \sum_{j=1}^n V_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) \quad (3-2)$$
$$i = 1, 2, \dots, n_D$$

En cada iteración debe resolverse el siguiente sistema lineal de ecuaciones:

$$\begin{bmatrix} H & N \\ M & L \end{bmatrix}^k \begin{bmatrix} \Delta\theta \\ \Delta V/V \end{bmatrix}^k = \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix}^k \quad (3-3)$$

cuya matriz de coeficientes es el jacobiano, cambiado de signo, del sistema no lineal.

El proceso se detiene cuando todos los componentes del vector de residuos son menores que ε .

Una vez implementado el código iterativo en Matlab, conoceríamos las tensiones en los nudos y los flujos de potencia por las líneas.

3.1.2 Flujo de cargas en continua

Este método se basa en la linealidad del subproblema $P - \theta$. Tomando una serie de simplificaciones llegamos fácilmente a un problema lineal entre potencias activas y ángulos, en el que las tensiones valen 1 pu y se ignoran los flujos de reactiva. En este modelo, el flujo de potencia activa por una línea entre los nudos i y j vale:

$$P_{ij} = \frac{1}{x_{ij}} (\theta_i - \theta_j) \quad (3-4)$$

donde x_{ij} es la reactancia serie del elemento en cuestión. En este método, además se ignoran las pérdidas Joule, porque el flujo de potencia es idéntico en los dos extremos. Para el desarrollo de los algoritmos, vamos a expresar este método de forma matricial, es decir:

$$P_{ij} = [X^{-1}A^T B^{-1}] \cdot P \quad (3-5)$$

donde A es la matriz de incidencias de la red, excluyendo el nudo de referencia, y X es una matriz diagonal de reactancias. La matriz B se construye como la matriz de admitancias de nudos pero utilizando exclusivamente reactancias.

Una vez ejecutado el algoritmo donde implementamos este código obtendremos los flujos por las líneas. A diferencia del método de Newton-Raphson estos resultados son menos exactos, aunque nos proporcionarán una información muy aproximada. Por otra parte, con este método no podremos calcular tensiones en los nudos. Las desventajas de este método se compensan con una gran mejora del coste computacional a la hora de ejecutarlo.

3.2 Análisis de contingencias

En nuestro caso vamos a proponer un análisis de seguridad dónde se tengan en cuenta los siguientes eventos simples:

- Fallo individual de cada generador. Aquí tendremos en cuenta dos situaciones: una donde la pérdida de generación la asuma el generador de referencia y otra donde la pérdida la asuman el resto de generadores disponibles de forma proporcional a su potencia nominal.
- Fallo individual de cada rama, bien sea una línea o un transformador.

El análisis de seguridad, como hemos adelantado, empleará factores de distribución. Este análisis, al igual que ocurría con el flujo de cargas en continua, se basa en la linealidad del subproblema $P - \theta$. Si partimos de la ecuación vista en ese apartado (3-5) llegamos a la expresión básica para el análisis de seguridad que queremos realizar.

Matemáticamente:

$$P_{ij} = [X^{-1}A^T B^{-1}] \cdot P = S \cdot P \quad (3-6)$$

donde S es la matriz de sensibilidades que relaciona los flujos de potencia y las potencias inyectadas en los nudos.

$$P_{ij} = S \cdot (P + \Delta P) = P_{ij}^0 + S \cdot \Delta P \quad (3-7)$$

Los elementos de esta matriz son los denominados *factores de distribución*. Estos se definen como el aumento de potencia por una rama que une los nudos m y n ante un incremento unitario en la potencia inyectada en el nudo i :

$$\rho_{mn}^i = \frac{\Delta P_{mn}^i}{\Delta P_i} = \frac{\Delta \theta_m - \Delta \theta_n}{x_{mn}} = S_{mn,i} \quad (3-8)$$

3.2.1 Análisis de contingencias en generadores

Si analizamos el fallo del generador localizado en el nudo i , la variación de potencia a través del elemento mn se obtendrá en cada caso como:

- Si la pérdida de generación es asumida por el nudo slack:

$$\Delta P_{mn} = \rho_{mn}^i \cdot \Delta P_i \quad (3-9)$$

- Si la pérdida de generación es asumida de forma proporcional a la potencia nominal del resto de generadores:

$$\Delta P_{mn} = \rho_{mn}^i \cdot \Delta P_i - \sum_{j \neq i} \rho_{mn}^i \cdot \gamma_{ji} \cdot \Delta P_i \quad (3-10)$$

donde γ_{ji} cumple:

$$\sum_{j \neq i} \gamma_{ji} = 1 \quad (3-11)$$

$$\gamma_{ji} = \frac{P_j^{nom}}{\sum_{k \neq i} P_k^{nom}} \quad (3-12)$$

siendo P_j^{nom} la potencia nominal del generador asociado al nudo j . De esta forma, los generadores de mayor potencia se harán cargo de asumir mayor generación, siempre y cuando no sobrepase el límite de generación de dicho generador.

De este modo, podemos obtener los flujos de potencia por las diferentes ramas en cada caso. Para ello utilizamos la ecuación (3-7). Como flujo de potencia inicial por las líneas, P_{ij}^0 , vamos a utilizar en este caso los flujos calculados inicialmente a través del método de Newton-Raphson, a excepción de las redes donde este método iterativo no converja. En ese caso, utilizaremos los calculados mediante DCLF.

3.2.2 Análisis de contingencias en líneas

Además de analizar el estado de la red cuando pierde elementos de generación, en este apartado vamos a explicar cómo calculamos los flujos por las líneas cuando simulamos la pérdida de las líneas que unen los diferentes nudos de una en una.

El procedimiento en este caso es similar. El principal aspecto a tener en cuenta es que ahora, cuando calculemos la matriz de sensibilidades, S , a partir de la ecuación (3-6), esta no será constante en cada simulación. Esto es así debido a que la topología de la red cambia, afectando a la construcción de la matriz de incidencias, A , de la matriz de reactancias, X , y de la matriz de admitancias, B . En el caso anterior, cuando simulábamos la pérdida de la generación, esto no ocurría, ya que esas matrices permanecían constantes.

Teniendo en cuenta esto, para obtener los nuevos flujos volvemos a sustituir en la ecuación (3-7). En este caso, para calcular los flujos por las ramas iniciales, P_{ij}^0 , vamos utilizar los calculados con DCLF, ya que este método, al no tener en cuenta las pérdidas, se consideran los mismos flujos en los dos extremos.

Después de tomar estas consideraciones, logramos resolver el análisis frente a contingencias en las ramas.

3.3 Detección de sobrecargas

Con la información obtenida del análisis de seguridad y los datos de los límites máximos los elementos del sistema vamos a programar un algoritmo capaz de detectar si estos límites se alcanzan. En ese caso, una vez detectada la sobrecarga, el programa debe actuar realizando un flujo de carga de la misma contingencia utilizando el método de Newton-Raphson. El objetivo es evaluar la fiabilidad de realizar el análisis con el modelo lineal aproximado.

Dado que muchos archivos de datos no incluyen límites de carga de líneas, se han utilizado valores típicos para límites térmicos, a falta de información más concreta.

Tabla 3-1 Potencias típicas (MW) en líneas eléctricas aéreas.

Tensión	Límite térmico a 75°C (MW)
66 kV	51
132 kV	115
220 kV	528
400 kV	1070

Para los casos donde las tensiones sean distintas a las que aparecen en la Tabla 3-1 realizaremos una interpolación lineal.

En el caso de los límites de carga en ramas con transformadores, emplearemos el límite de la rama con menor valor.

4 INTERFAZ INFORMÁTICA

Para visualizar correctamente tanto los resultados como las características del análisis vamos a diseñar a través de la herramienta *Matlab Guide* una interfaz gráfica. El objetivo de esta interfaz es simplificar y automatizar el proceso de los análisis.

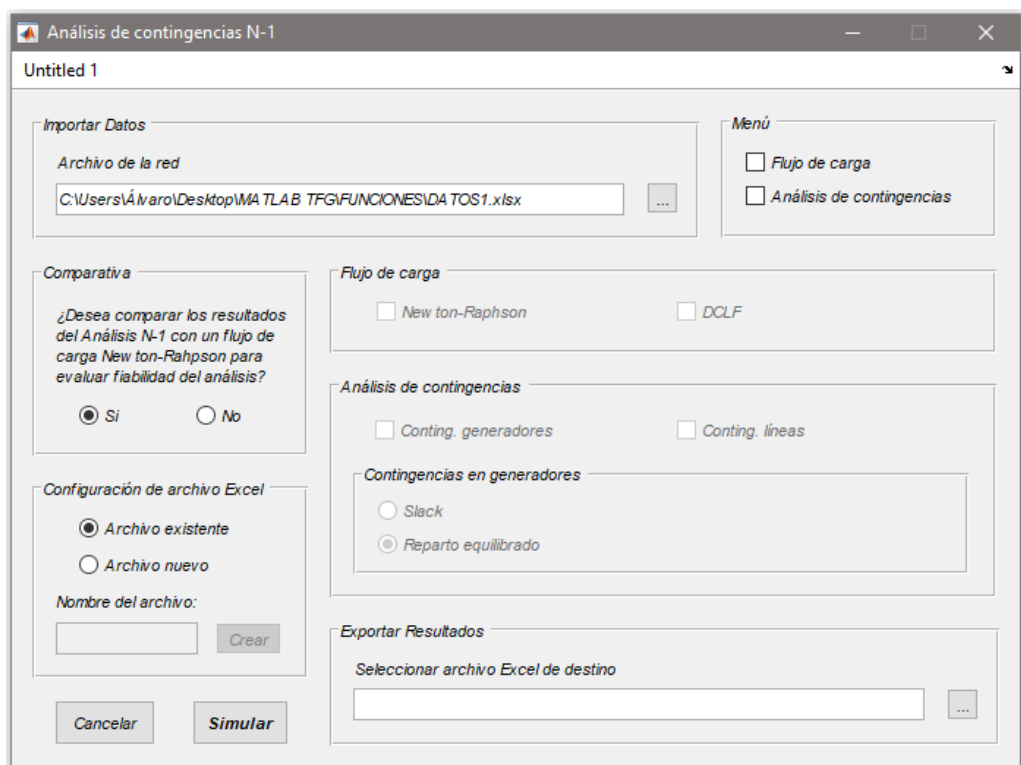


Figura 4-1. Interfaz gráfica para el análisis N-1.

En la Figura 4-1 podemos observar que la interfaz se divide en varias subventanas. Cada una representa una parte del análisis. En la venta titulada *Importar Datos* debemos seleccionar un archivo Excel donde tengamos la red que queremos analizar descrita. Este fichero Excel debe tener una estructura determinada, tal y como se muestra en las Figuras 4-2 y 4-3.

En la Figura 2 cabe destacar que la columna *TIPO* indica un valor entre 1 y 3 para designar el tipo de nudo. Para indicar que un nudo es de referencia debemos asignarle el tipo 1. Si el nudo es PV, es decir, conocemos a priori su tensión y su potencia activa, le asignaremos el tipo 2. Si el nudo es PQ, porque desconozcamos la tensión y conozcamos la potencia activa y reactiva, entonces le asignaremos el tipo 3.

Además, es importante introducir todos los datos, tanto de nudos como de líneas en por unidad. Nosotros vamos a usar en todos los análisis 100 MVA como potencia base y la tención base de cada nudo.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
1	BUS	TIPO	Pg	Qg	Pload	Qload	Bsh	Vm	Va (rad)	baseKV	Vmax	Vmin	Pmax	Pmin
2	1	1	2,32392	-0,16549	0	0	0	1,06	0	138	1,1	0,9	100	-100
3	2	3	0,4	0,43556	0,217	0,127	0	1,045	-0,0869174	138	1,1	0,9	100	-100
4	3	3	0	0,25075	0,942	0,19	0	1,01	-0,2221804	138	1,1	0,9	100	-100
5	4	2	0	0	0,478	-0,039	0	1,0177	-0,1799434	138	1,1	0,9	0	0
6	5	2	0	0	0,076	0,016	0	1,0195	-0,1530654	138	1,1	0,9	0	0
7	6	3	0	0,1273	0,112	0,075	0	1,07	-0,2481858	138	1,1	0,9	100	-100
8	7	2	0	0	0	0	0	1,0615	-0,233176	138	1,1	0,9	0	0
9	8	3	0	0,17623	0	0	0	1,09	-0,233176	138	1,1	0,9	100	-100
10	9	2	0	0	0,295	0,166	0,06333333	1,0559	-0,2607522	138	1,1	0,9	0	0
11	10	2	0	0	0,09	0,058	0	1,051	-0,2635447	138	1,1	0,9	0	0
12	11	2	0	0	0,035	0,018	0	1,0569	-0,2581342	138	1,1	0,9	0	0
13	12	2	0	0	0,061	0,016	0	1,0552	-0,2631957	138	1,1	0,9	0	0
14	13	2	0	0	0,135	0,058	0	1,0504	-0,2645919	138	1,1	0,9	0	0
15	14	2	0	0	0,149	0,05	0	1,0355	-0,2797763	138	1,1	0,9	0	0
16														
17														
18														
19														
20														
21														

Figura 4-2. Estructura para Excel de datos de entrada de los nodos de la red.

	A	B	C	D	E	F
1	Ni	Nf	R	X	Bsh/2	Pmax
2	1	2	0,01938	0,05917	0,0264	10
3	1	5	0,05403	0,22304	0,0246	10
4	2	3	0,04699	0,19797	0,0219	10
5	2	4	0,05811	0,17632	0,017	10
6	2	5	0,05695	0,17388	0,0173	10
7	3	4	0,06701	0,17103	0,0064	10
8	4	5	0,01335	0,04211	0	10
9	6	11	0,09498	0,1989	0	10
10	6	12	0,12291	0,25581	0	10
11	6	13	0,06615	0,13027	0	10
12	7	8	0	0,17615	0	10
13	7	9	0	0,11001	0	10
14	9	10	0,03181	0,0845	0	10
15	9	14	0,12711	0,27038	0	10
16	10	11	0,08205	0,19207	0	10
17	12	13	0,22092	0,19988	0	10
18	13	14	0,17093	0,34802	0	10
19	4	7	0	0,20912	0	10
20	4	9	0	0,55618	0	10

Figura 4-3. Estructura para Excel de datos de entrada de las líneas de la red.

Una vez seleccionada la red que queremos analizar, en la ventana *Menú* de la Figura 1 podremos seleccionar si deseamos realizar un Flujo cargas y/o un análisis de contingencias. Dependiendo de lo que seleccionemos, las ventanas siguientes se activarán, permitiendo indicar el tipo de flujo que queremos realizar y el tipo de análisis.

Además, en la ventana *Comparativa* podemos indicar si queremos realizar en caso de detección de sobrecargas una comparativa con un flujo de carga donde se tenga en cuenta la contingencia, utilizando el método de Newton-Raphson. Esta opción es interesante para este proyecto, ya que nos permite analizar la fiabilidad del análisis mediante factores de distribución.

Por último, solo queda seleccionar un archivo Excel donde queramos que se escriban todos los resultados de los procesos seleccionados. Una vez seleccionado, cuando clickemos el botón *Simular* comenzarán a ejecutarse los algoritmos. Una vez finalizado el análisis, aparecerá un mensaje indicando que ya podremos acceder a los resultados.

Los resultados se habrán exportado de dicho fichero Excel con el formato que se muestra las Figuras 4-4, 4-5, 4-6 y 4-8.

En las Figuras 4-4 y 4-5 se muestran los resultados de los flujos iniciales resueltos por Newton Raphson y por flujos de continua. Podemos apreciar como en Newton Raphson, además de los flujos por las ramas se obtiene la información de los nodos (tensiones y potencias nodales).

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O
1	26/06/2022 12:22		NW-RP		3 ITER										
2	Flujos de potencia por las ramas						Tensión nodal				Potencia nodal				
3	Origen	Destino	Pij (pu)	Qij (pu)	Pji (pu)	Qji (pu)	Nudos	V (pu)	Alpha (rad)	Alpha (°)	P (pu)	Q (pu)			
4	1	2	1,62092538	-0,210423	-1,57504408	0,29203089	1	1,06	0	0	2,40251595	-0,17397795			
5	1	5	0,78159057	0,03644504	-0,75201781	0,03242427	2	1,04467312	-0,08989659	-5,15069544	0,18300003	0,30855601			
6	2	3	0,7435017	0,03330534	-0,71955907	0,02132909	3	1,00990696	-0,22729516	-13,0230535	-0,94199999	0,06075001			
7	2	4	0,58479227	-0,02290639	-0,56658196	0,042001	4	1,0177	-0,18727302	-10,7299536	-0,47799998	-0,09407624			
8	2	5	0,42975014	0,00613026	-0,42007999	-0,01346679	5	1,0195	-0,15877505	-9,0971401	-0,07600024	-0,25771924			
9	3	4	-0,22244093	0,03942092	0,22583056	-0,04392554	6	1,05562343	-0,26263399	-15,0478189	-0,11199978	0,05230125			
10	4	5	-0,64759657	0,17180809	0,65338273	-0,15355676	7	1,0615	-0,25051895	-14,3536785	1,9244E-09	0,12030144			
11	6	11	0,07505916	-0,04181293	-0,07442994	0,04313059	8	1,08998025	-0,25051895	-14,3536785	1,1102E-16	0,17623			
12	6	12	0,07850012	-0,03492735	-0,07768588	0,03662202	9	1,0559	-0,28257064	-16,1901051	-0,29499998	0,11116355			
13	6	13	0,17715577	-0,04527747	-0,17517103	0,04918604	10	1,051	-0,28523277	-16,342634	-0,08999998	-0,0572167			
14	7	8	-1,9595E-16	-0,17162526	1,6653E-16	0,17623	11	1,0569	-0,2795756	-16,0185019	-0,03499992	0,05884492			
15	7	9	0,32650303	0,05926802	-0,32650303	-0,04851709	12	1,0552	-0,28451756	-16,3016555	-0,06099984	0,04352696			
16	9	10	0,05082667	0,04214256	-0,05070229	-0,04181216	13	1,0504	-0,28615036	-16,3952081	-0,13499973	0,05978942			
17	9	14	0,09390943	0,03624929	-0,09275419	-0,03379194	14	1,0355	-0,30158027	-17,2792769	-0,14899998	-0,0501283			
18	10	11	-0,03929769	-0,01540454	0,03943002	0,01571433									
19	12	13	0,01668603	0,00690494	-0,01662133	-0,0068464									
20	13	14	0,05679264	0,01744978	-0,05624578	-0,01633636									
21	4	7	0,32650303	-0,20282793	0,32650303	0,23265868									
22	4	9	0,18384495	-0,06113186	-0,18384495	0,0812888									
23	5	6	0,44271483	-0,12311996	-0,44271483	0,174319									

Figura 4-4. Estructura de datos de salida de flujo de carga inicial con Newton-Raphson.

	A	B	C	D	E	F	G
1	DCLF						
2	Flujos de potencia por las ramas						
3	Origen	Destino	Pij (pu)				
4	1	2	1,46734439				
5	1	5	0,70510416				
6	2	3	0,69807197				
7	2	4	0,54723033				
8	2	5	0,40512804				
9	3	4	-0,24387334				
10	4	5	-0,61847512				
11	6	11	0,0600271				
12	6	12	0,07500782				
13	6	13	0,16878508				
14	7	8	4,0656E-16				
15	7	9	0,282039				
16	9	10	0,0649729				
17	9	14	0,10120711				
18	10	11	-0,0250271				
19	12	13	0,01400782				
20	13	14	0,04779289				
21	4	7	0,282039				
22	4	9	0,16183089				
23	5	6	0,41582				

Figura 4-5. Estructura de datos de salida de flujo de carga inicial con DCLF.

	A	B	C	D	E	F	G
1	Análisis N-1			Asume Pérdidas el Slack			
2	Flujos de potencia por las ramas			<<Contingencia en Generador>>			
3	Origen	Destino		2			
4	1	2		1,9554872			
5	1	5		0,84603748			
6	2	3		0,73242717			
7	2	4		0,56162129			
8	2	5		0,39856895			
9	3	4		-0,23350964			
10	4	5		-0,67932962			
11	6	11		0,07598628			
12	6	12		0,07863629			
13	6	13		0,1776321			
14	7	8		-1,4616E-16			
15	7	9		0,32491294			
16	9	10		0,04989955			
17	9	14		0,09329694			
18	10	11		-0,04022481			
19	12	13		0,0168222			
20	13	14		0,05740513			
21	4	7		0,32491294			
22	4	9		0,18293257			
23	5	6		0,44425445			

Figura 4-6. Estructura de datos de salida de análisis de contingencias en generadores.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P
1	Análisis N-1															
2	Flujos de potencia por las ramas <<Contingencia en Línea>>															
3	Origen	Destino	1-2	1-5	2-3	2-4	2-5	3-4	4-5	6-11	6-12	6-13	7-8	7-9	9-10	
4	1	2	0	2,16676601	1,3207028	1,31667473	1,32035624	1,5185603	1,64611236	1,46914551	1,46758985	1,46679829	1,45603216	1,46539486	1,464829	
5	1	5	2,1487127	0	0,84901458	0,85297891	0,85051784	0,65482428	0,52395567	0,70280225	0,70479044	0,70324601	0,71167493	0,70759573	0,708318	
6	2	3	0,44971252	0,81598398	0	0,85368188	0,78153675	0,94193952	0,85067412	0,69980722	0,69830846	0,69947269	0,69044444	0,69619375	0,695648	
7	2	4	0,02789573	0,79401886	0,86416858	0	0,72190688	0,4365057	0,86660321	0,5508619	0,54772525	0,5501618	0,53126715	0,54329954	0,542158	
8	2	5	-0,29365184	0,73989266	0,63962633	0,6460822	0	0,32320448	0,11193124	0,40156242	0,4046421	0,4022498	0,41740599	0,40898744	0,41010	
9	3	4	-0,49179099	-0,12593664	-0,94194211	-0,08825815	-0,16040583	0	-0,09126164	-0,24213802	-0,24363684	-0,24247256	-0,25150126	-0,24575163	-0,246296	
10	4	5	-1,3293459	-0,26950533	-0,97724955	-0,98712512	-0,3731323	-0,49313442	0	-0,6484041	-0,62255396	-0,64263434	-0,50093734	-0,58608022	-0,576680	
11	6	11	0,08079631	0,04716762	0,07185747	0,0721831	0,05137484	0,0589408	0,14681753	0	0,06502563	0,08963372	0,14215571	0,125	0,008808	
12	6	12	0,07805826	0,0731191	0,07674538	0,07679321	0,07373703	0,07440079	0,08775501	0,08039474	0	0,18529071	0,08707032	0,06917705	0,097508	
13	6	13	0,17945565	0,16217827	0,17486315	0,17503045	0,16433981	0,16666166	0,21337532	0,18762877	0,23391589	0	0,21098022	0,14838881	0,247491	
14	7	8	-2,2322E-16	5,3798E-16	5,2442E-16	4,3163E-16	3,6589E-16	3,8629E-16	4,036E-16	4,032E-16	4,0104E-16	3,6104E-16	3,3358E-16	4,1089E-16	4,1797E-16	
15	7	9	0,246419	0,2920629	0,26783844	0,26744754	0,29017484	0,2870001	0,18896238	0,30446634	0,28509548	0,30014275	0	0,25776381	0,250720	
16	9	10	0,04420369	0,07783238	0,05314253	0,0528169	0,07362516	0,06910592	-0,02181753	0,125	0,05997437	0,03536628	-0,01715571	0	0,116191	
17	9	14	0,08748609	0,10970263	0,09393147	0,09317634	0,10692316	0,10393756	0,04386967	0,07697649	0,11108411	0,15970929	0,04694946	0,12743414		
18	10	11	-0,04579631	-0,01216762	-0,03685747	-0,0371831	-0,01637484	-0,02089408	-0,1181753	0,035	-0,03002563	-0,05463372	-0,10715571	-0,09	0,026191	
19	12	13	0,01705826	0,0121191	0,01574538	0,01579321	0,01273703	0,01340079	0,02675501	0,01939474	-0,061	0,12429071	0,02607032	0,00817705	0,036508	
20	13	14	0,06151391	0,03929737	0,05560853	0,05582366	0,04207684	0,04506244	0,10513033	0,07202351	0,03791589	-0,01070929	0,10205054	0,02156586	0,1	
21	4	7	0,246419	0,2920629	0,26783844	0,26744754	0,29017484	0,2870001	0,18896238	0,30446634	0,28509548	0,30014275	1,3878E-15	0,25776381	0,250720	
22	4	9	0,14139252	0,1675825	0,15368277	0,15345847	0,16649915	0,16467752	0,10842454	0,17469945	0,16358467	0,17221863	0,30274079	0,14790206	0,143860	
23	5	6	0,45031022	0,39446499	0,435466	0,43600676	0,40145168	0,40895653	0,55994786	0,38002351	0,41094152	0,38692442	0,55220624	0,45456586	0,465808	

Figura 4-7. Estructura de datos de salida de análisis de contingencias en líneas.

En las Figuras 4-6 y 4-7 vemos los resultados de los análisis de contingencias mediante factores de distribución.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O			
1	26/06/2022 12:25 Flujo de Carga - Newton Raphson Asume Pérdidas el Slack																	
2	<<Contingencia en Generador 2>>																	
3	Flujos de potencia por las ramas						Tensión nodal						Potencia nodal					
4	Origen	Destino	Pij (pu)	Qij (pu)	Pji (pu)	Qji (pu)	Nodos	V (pu)	Alpha (rad)	Alpha (º)	P (pu)	Q (pu)						
5	1	2	1,97343597	-0,20065635	-1,90575968	0,3490837	1	1,06	0	0	2,82772487	-0,16939264						
6	1	5	0,85428891	0,03126371	-0,81902807	0,06108644	2	1,03965503	-0,10918077	-6,25559752	-0,21699916	0,30856125						
7	2	3	0,73093552	0,02144319	-0,70762046	0,03088675	3	1,00740665	-0,2457414	-14,079945	-0,94199991	0,06075						
8	2	4	0,56038287	-0,04650541	-0,54345762	0,06187863	4	1,0177	-0,20425396	-11,7028896	-0,47799983	-0,05228243						
9	2	5	0,39744213	-0,01546023	-0,3891189	0,00419221	5	1,0195	-0,17425257	-9,98393685	-0,07600004	-0,22100229						
10	3	4	-0,23437944	0,02986325	0,2380939	-0,03350652	6	1,05565804	-0,27860067	-15,9626427	-0,11199978	0,05230127						
11	4	5	-0,68092961	0,18345889	0,68733993	-0,16323877	7	1,0615	-0,26724476	-15,3119966	1,9011E-09	0,12017622						
12	6	11	0,07634258	-0,04221712	-0,07569395	0,04357543	8	1,08998025	-0,26724476	-15,3119966	1,9429E-16	0,17623						
13	6	12	0,07864277	-0,0348507	-0,0778267	0,03654917	9	1,0559	-0,29916728	-17,1410225	-0,29499998	0,11187685						
14	6	13	0,17782187	-0,04531771	-0,17582301	0,04925408	10	1,051	-0,30171996	-17,2872803	-0,08999998	-0,05714801						
15	7	8	-7,6328E-17	-0,17162526	8,3267E-17	0,17623	11	1,0569	-0,29580497	-16,9483766	-0,03499991	0,05875842						
16	7	9	0,32518769	0,05922593	-0,32518769	-0,04855918	12	1,0552	-0,30050784	-17,217831	-0,06099984	0,04329898						
17	9	10	0,04956642	0,04261323	-0,04944451	-0,0422894	13	1,0504	-0,30219696	-17,3146102	-0,13499973	0,05963914						
18	9	14	0,0931152	0,03660451	-0,09197394	-0,03417691	14	1,0355	-0,31793917	-18,2165726	-0,14899998	-0,05011484						
19	10	11	-0,04055547	-0,0148586	0,04069404	0,01518299												
20	12	13	0,01682686	0,00674981	-0,01676164	-0,0066908												
21	13	14	0,05758493	0,01707586	-0,05702603	-0,01593793												
22	4	7	0,32518769	-0,20291107	-0,32518769	0,23257555												
23	4	9	0,18310581	-0,06120237	-0,18310581	0,08121829												

Figura 4-8. Estructura de datos de salida de flujos de carga desconectando generadores.

Por último, en la Figura 4-8 se observan los resultados de la ejecución de los flujos de carga cuando se desconectan los generadores. La estructura de los datos es la misma que la empleada en los flujos iniciales. Para los flujos cuando se desconectan las ramas la estructura también es igual.

Teniendo estos resultados en Excel, operar con ellos para estudiarlos es muy sencillo. El objetivo de esta interfaz es automatizar y facilitar lo máximo posible el estudio de estas redes.

5 EVALUACIÓN DE LOS RESULTADOS

En este apartado, vamos a analizar los resultados que se obtienen al someter tres redes de diversas topologías a los algoritmos que hemos desarrollado. Estas redes han sido obtenidas de un repositorio de redes de prueba de la página web de la Universidad de Texas A&M [4]. Este repositorio cuenta con información de diversas redes. Nosotros vamos a utilizar cuatro de ellas: *IEEE-14*, *IEEE-39*, *IEEE-118* e *IEEE-300*.

5.1 Red IEEE-14

En primer lugar, vamos a estudiar la red IEEE-14. Esta red está compuesta por 14 nudos y 20 ramas, de las cuales 17 representan líneas y 3 representan transformadores. Además, esta red cuenta con 5 generadores y 11 cargas. Cabe destacar que, de los 5 generadores, sólo dos de ellos generan potencia activa, y son los generadores de los nudos 1 y 2. El resto son condensadores síncronos, que tienen como objetivo mantener las tensiones en los nudos. Se trata de una red de 138 kV de tensión nominal.

En la Figura 5-1 podemos observar un esquema de la red. En él vemos que el generador de referencia se encuentra en el Bus 1. Por lo tanto, para el análisis de contingencias en generadores solo vamos a analizar el caso en el que se pierde el generador del Bus 2.

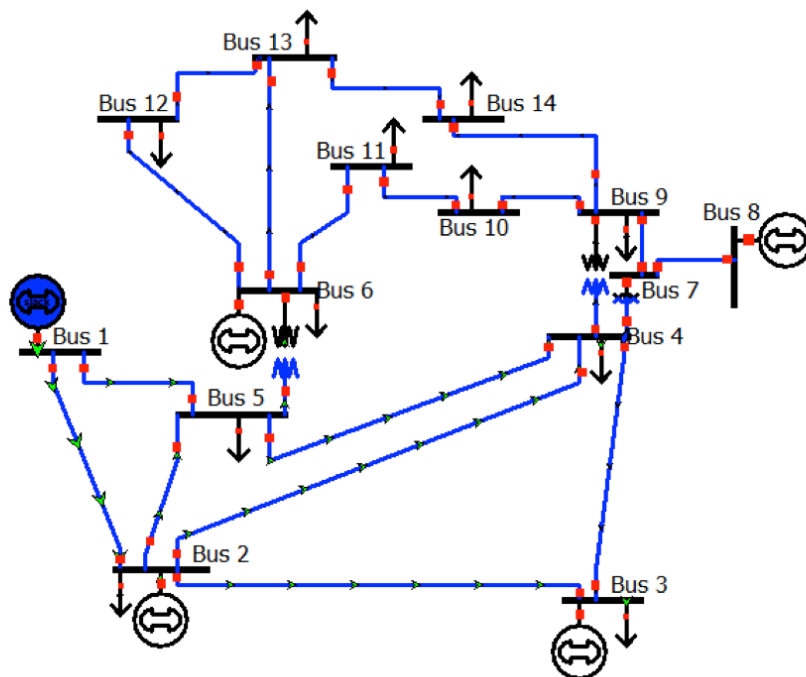


Figura 5-1. Esquema de la red IEEE-14.

A continuación, se muestran los resultados del primer flujo de cargas partiendo del estado inicial de la red. Para obtenerlos hemos utilizado el método de Newton-Raphson, que en este caso ha convergido en 3 iteraciones. Además, se muestran los resultados de los flujos obtenidos con el método DCLF.

En el método de Newton-Raphson se tienen en cuenta las pérdidas de las líneas y en el DCLF no, por eso en el primer método obtenemos P_{ij} y P_{ji} distintas. Para el cálculo de los errores se ha tenido en cuenta la media entre P_{ij} y P_{ji} .

Tabla 5-1 Flujo por las ramas utilizando Newton Raphson y DCLF para red de 14 nudos.

Origen	Destino	P_{ij} (pu)	P_{ji} (pu)	P_{ij} (DCLF) (pu)	Error(%)	Q_{ij} (pu)	Q_{ji} (pu)
1	2	1,6209	-1,5750	1,4673	8,175	-0,2104	0,2920
1	5	0,7816	-0,7520	0,7051	8,046	0,0364	0,0324
2	3	0,7435	-0,7196	0,6981	4,574	0,0333	0,0213
2	4	0,5848	-0,5666	0,5472	4,943	-0,0229	0,0420
2	5	0,4298	-0,4201	0,4051	4,657	0,0061	-0,0135
3	4	-0,2224	0,2258	-0,2439	8,806	0,0394	-0,0439
4	5	-0,6476	0,6534	-0,6185	4,922	0,1718	-0,1536
6	11	0,0751	-0,0744	0,0600	19,690	-0,0418	0,0431
6	12	0,0785	-0,0777	0,0750	3,951	-0,0349	0,0366
6	13	0,1772	-0,1752	0,1688	4,188	-0,0453	0,0492
7	8	0,0000	0,0000	0,0000	0,000	-0,1716	0,1762
7	9	0,3265	-0,3265	0,2820	13,618	0,0593	-0,0485
9	10	0,0508	-0,0507	0,0650	27,989	0,0421	-0,0418
9	14	0,0939	-0,0928	0,1012	8,438	0,0362	-0,0338
10	11	-0,0393	0,0394	-0,0250	36,421	-0,0154	0,0157
12	13	0,0167	-0,0166	0,0140	15,888	0,0069	-0,0068
13	14	0,0568	-0,0562	0,0478	15,440	0,0174	-0,0163
4	7	0,3265	-0,3265	0,2820	13,618	-0,2028	0,2327
4	9	0,1838	-0,1838	0,1618	11,974	-0,0611	0,0813
5	6	0,4427	-0,4427	0,4158	6,075	-0,1231	0,1743

Tabla 5-2 Tensiones y potencias nodales utilizando Newton Raphson para red de 14 nudos.

Nudos	Tensión nodal			Potencia nodal	
	V (pu)	Alpha (rad)	Alpha (°)	P (pu)	Q (pu)
1	1,06	0	0	2,40251595	-0,17397795
2	1,04467312	-0,08989659	-5,15069544	0,18300003	0,3085601
3	1,00990696	-0,22729516	-13,0230535	-0,94199999	0,06075001
4	1,0177	-0,18727302	-10,7299536	-0,47799998	-0,09407624
5	1,0195	-0,15877505	-9,0971401	-0,07600024	-0,25771924
6	1,05562343	-0,26263399	-15,0478189	-0,11199978	0,05230125
7	1,0615	-0,25051895	-14,3536785	1,9244E-09	0,12030144
8	1,08998025	-0,25051895	-14,3536785	0	0,17623
9	1,0559	-0,28257064	-16,1901051	-0,29499998	0,11116355
10	1,051	-0,28523277	-16,342634	-0,08999998	-0,0572167
11	1,0569	-0,2795756	-16,0185019	-0,03499992	0,05884492
12	1,0552	-0,28451756	-16,3016555	-0,06099984	0,04352696
13	1,0504	-0,28615036	-16,3952081	-0,13499973	0,05978942
14	1,0355	-0,30158027	-17,2792769	-0,14899998	-0,0501283

Si analizamos los resultados de los flujos por las ramas de la Tabla 5-1 podemos observar que el error medio cometido entre utilizar el método de Newton-Raphson y el DCLF es de $\pm 11,07\%$, siendo el máximo cometido del $36,421\%$, en la rama que va del nudo 10 al 11.

A continuación, vamos a mostrar los resultados de la contingencia del generador del bus 2, asumiendo la generación el generador slack del nudo 1, calculados utilizando los factores de distribución (FD). También se muestran los resultados de realizar un flujo de cargas con Newton-Raphson simulando la contingencia.

Tabla 5-3 Contingencia del generador 2 partiendo de DCLF de la red de 14 nudos.

Origen	Destino	Pij FD (pu)	Pij (pu)	Pji (pu)	Error (%)
1	2	1,9555	1,9734	-1,9058	0,819
1	5	0,8460	0,8543	-0,8190	1,121
2	3	0,7324	0,7309	-0,7076	1,828
2	4	0,5616	0,5604	-0,5435	1,758
2	5	0,3986	0,3974	-0,3891	1,345
3	4	-0,2335	-0,2344	0,2381	1,154
4	5	-0,6793	-0,6809	0,6873	0,702
6	11	0,0760	0,0763	-0,0757	0,042
6	12	0,0786	0,0786	-0,0778	0,513
6	13	0,1776	0,1778	-0,1758	0,458
7	8	0,0000	0,0000	0,0000	0,000
7	9	0,3249	0,3252	-0,3252	0,084
9	10	0,0499	0,0496	-0,0494	0,796
9	14	0,0933	0,0931	-0,0920	0,813
10	11	-0,0402	-0,0406	0,0407	0,984
12	13	0,0168	0,0168	-0,0168	0,166
13	14	0,0574	0,0576	-0,0570	0,174
4	7	0,3249	0,3252	-0,3252	0,084
4	9	0,1829	0,1831	-0,1831	0,095
5	6	0,4443	0,4448	-0,4448	0,124

Como podemos apreciar, el error cometido entre emplear un método u otro para esta red es muy pequeño. El máximo error se comete en la rama del nudo 2 al 3, con un $\pm 1,828\%$, siendo el error medio $\pm 0,653\%$.

Para las contingencias como hemos explicado anteriormente necesitamos conocer los flujos iniciales por las ramas. En este caso, estos flujos han sido calculados mediante Newton-Raphson. Esto influye en el error, reduciéndolo considerablemente. Sin embargo, empeora los tiempos de ejecución, sobretodo en redes de mayor tamaño. En este caso, los tiempos de ejecución son prácticamente iguales.

A continuación, se muestran los resultados de la misma contingencia, pero partiendo de los flujos calculados mediante DCLF (columna Pij FD 2 de la Tabla 5-4).

Tabla 5-4 Contingencia del generador 2 partiendo de Newton-Raphson de la red de 14 nudos.

Origen	Destino	Pij FD anterior (pu)	Pij FD 2 (pu)	Error anterior (%)	Error (%)
1	2	1,9555	1,8019	0,819	7,099
1	5	0,846	0,7696	1,121	8,020
2	3	0,7324	0,6870	1,828	4,484
2	4	0,5616	0,5241	1,758	5,053
2	5	0,3986	0,3739	1,345	4,909
3	4	-0,2335	-0,2549	1,154	7,912
4	5	-0,6793	-0,6502	0,702	4,954

6	11	0,076	0,0610	0,042	19,797
6	12	0,0786	0,0751	0,513	3,908
6	13	0,1776	0,1693	0,458	4,264
7	8	0	0,0000	0	0,000
7	9	0,3249	0,2804	0,084	13,761
9	10	0,0499	0,0640	0,796	29,385
9	14	0,0933	0,1006	0,813	8,692
10	11	-0,0402	-0,0260	0,984	36,152
12	13	0,0168	0,0141	0,166	15,810
13	14	0,0574	0,0484	0,174	15,523
4	7	0,3249	0,2804	0,084	13,761
4	9	0,1829	0,1609	0,095	12,114
5	6	0,4443	0,4174	0,124	6,169

En este caso, comprobamos que el error medio aumenta, alcanzando 11,09%. Los errores son muy similares a los cometidos entre calcular los flujos iniciales mediante DCLF o Newton-Raphson.

En casos donde la red no sea muy compleja, vemos que es más útil calcular mediante flujos de carga con Newton-Raphson, ya que los tiempos de ejecución son similares, y el error se reduce bastante.

El límite térmico a 75 °C en líneas de 138 kV impone flujos de potencia inferiores a 144 MW (1,44). Solo lo supera la rama 1-2 en un 35,8% y, como podemos observar, la sobrecarga es detectada satisfactoriamente por los dos métodos, y en ambos casos: cuando empleamos los flujos iniciales calculados mediante Newton-Raphson y cuando utilizamos los de DCLF.

Si tenemos en cuenta los tiempos de ejecución, el método que emplea factores de distribución es mucho más rápido, lo que agiliza los procesos de análisis de contingencias. Sin embargo, gracias al método de Newton-Raphson conseguimos más información de la contingencia, como por ejemplo los flujos de potencia reactiva por las ramas y las tensiones en los nudos.

En este caso, al realizar el flujo de carga mediante Newton-Raphson sin el generador del bus 2 podemos observar que las tensiones apenas se modifican, sin superar los límites de tensión establecidos del $\pm 10\%$ (1,1 y 0,9 en pu).

Tabla 5-5 Tensiones y potencias nodales contingencia del generador 2 de la red de 14 nudos.

Nudos	Tensión nodal			Potencia nodal	
	V (pu)	Alpha (rad)	Alpha (°)	P (pu)	Q (pu)
1	1,06	0	0	2,82772487	-0,16939264
2	1,03965503	-0,10918077	-6,25559752	-0,21699916	0,30856125
3	1,00740665	-0,2457414	-14,079945	-0,94199991	0,06075
4	1,0177	-0,20425396	-11,7028896	-0,47799983	-0,05228243
5	1,0195	-0,17425257	-9,98393685	-0,07600004	-0,22100229
6	1,05565804	-0,27860067	-15,9626427	-0,11199978	0,05230127
7	1,0615	-0,26724476	-15,3119966	0	0,12017622
8	1,08998025	-0,26724476	-15,3119966	0	0,17623
9	1,0559	-0,29916728	-17,1410225	-0,29499998	0,11187685
10	1,051	-0,30171996	-17,2872803	-0,08999998	-0,05714801
11	1,0569	-0,29580497	-16,9483766	-0,03499991	0,05875842
12	1,0552	-0,30050784	-17,217831	-0,06099984	0,04329898
13	1,0504	-0,30219696	-17,3146102	-0,13499973	0,05963914
14	1,0355	-0,31793917	-18,2165726	-0,14899998	-0,05011484

Atendiendo a los resultados del análisis de las contingencias en líneas, vamos a analizar los resultados donde se producen sobrecargas. En este caso, la línea 1-2 se encuentra sobrecargada desde el flujo inicial, donde no hemos realizado la contingencia. Por esto, podríamos esperar que, al calcular los flujos siguiéramos obteniendo sobrecargas. Sin embargo, para las contingencias en las líneas 2-3, 2-4 y 2-5 se consigue mantener todas las líneas por debajo de los límites, aunque no con mucho margen. Esto resulta interesante para comparar que ocurre al emplear ambos métodos en la detección de sobrecargas.

Tabla 5-6 Contingencia de 10 líneas de la red de 14 nudos.

Origen	Destino	1-2	1-5	2-3	2-4	2-5	3-4	4-5	6-11	6-12	6-13
1	2	0,000	2,167	1,321	1,317	1,320	1,519	1,646	1,469	1,468	1,469
1	5	2,149	0,000	0,849	0,853	0,851	0,655	0,524	0,703	0,705	0,703
2	3	0,450	0,816	0,000	0,854	0,782	0,942	0,851	0,700	0,698	0,699
2	4	0,028	0,794	0,864	0,000	0,722	0,437	0,867	0,551	0,548	0,550
2	5	-0,294	0,740	0,640	0,646	0,000	0,323	0,112	0,402	0,405	0,402
3	4	-0,492	-0,126	-0,942	-0,088	-0,160	0,000	-0,091	-0,242	-0,244	-0,242
4	5	-1,329	-0,270	-0,977	-0,987	-0,373	-0,493	0,000	-0,648	-0,623	-0,643
6	11	0,081	0,047	0,072	0,072	0,051	0,056	0,147	0,000	0,065	0,090
6	12	0,078	0,073	0,077	0,077	0,074	0,074	0,088	0,080	0,000	0,185
6	13	0,179	0,162	0,175	0,175	0,164	0,167	0,213	0,188	0,234	0,000
7	8	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
7	9	0,246	0,292	0,268	0,267	0,290	0,287	0,189	0,304	0,285	0,300
9	10	0,044	0,078	0,053	0,053	0,074	0,069	-0,022	0,125	0,060	0,035
9	14	0,087	0,110	0,093	0,093	0,107	0,104	0,044	0,077	0,111	0,160
10	11	-0,046	-0,012	-0,037	-0,037	-0,016	-0,021	-0,112	0,035	-0,030	-0,055
12	13	0,017	0,012	0,016	0,016	0,013	0,013	0,027	0,019	-0,061	0,124
13	14	0,062	0,039	0,056	0,056	0,042	0,045	0,105	0,072	0,038	-0,011
4	7	0,246	0,292	0,268	0,267	0,290	0,287	0,189	0,304	0,285	0,300
4	9	0,141	0,168	0,154	0,153	0,166	0,165	0,108	0,175	0,164	0,172
5	6	0,450	0,394	0,435	0,436	0,401	0,409	0,560	0,380	0,411	0,387

Tabla 5-7 Contingencia de otras 10 líneas de la red de 14 nudos.

Origen	Destino	7-8	7-9	9-10	9-14	10-11	12-13	13-14	4-7	4-9	5-6
1	2	1,456	1,465	1,465	1,468	1,467	1,469	1,456	1,463	1,488	1,456
1	5	0,712	0,708	0,708	0,704	0,705	0,704	0,712	0,708	0,678	0,712
2	3	0,690	0,696	0,696	0,699	0,698	0,699	0,690	0,695	0,718	0,690
2	4	0,531	0,543	0,542	0,549	0,547	0,550	0,531	0,541	0,589	0,531
2	5	0,417	0,409	0,410	0,404	0,405	0,403	0,417	0,410	0,364	0,417
3	4	-0,252	-0,246	-0,246	-0,243	-0,244	-0,243	-0,252	-0,247	-0,224	-0,252
4	5	-0,501	-0,586	-0,577	-0,631	-0,619	-0,638	-0,501	-0,569	-0,966	-0,501
6	11	0,142	0,125	0,009	0,035	0,061	0,084	0,142	0,094	-0,190	0,142
6	12	0,087	0,069	0,098	0,077	0,061	0,064	0,087	0,080	0,038	0,087
6	13	0,211	0,148	0,247	0,177	0,181	0,132	0,211	0,186	0,040	0,211
7	8	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
7	9	0,000	0,258	0,251	0,291	0,283	0,297	0,000	0,385	0,543	0,000
9	10	-0,017	0,000	0,116	0,090	0,064	0,041	-0,017	0,031	0,315	-0,017
9	14	0,047	0,127	0,000	0,091	0,103	0,149	0,047	0,079	0,267	0,047
10	11	-0,107	-0,090	0,026	0,000	-0,026	-0,049	-0,107	-0,059	0,225	-0,107

12	13	0,026	0,008	0,037	0,016	0,000	0,003	0,026	0,019	-0,023	0,026
13	14	0,102	0,022	0,149	0,058	0,046	0,000	0,102	0,070	-0,118	0,102
4	7	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
4	9	0,303	0,148	0,144	0,167	0,162	0,170	0,303	0,000	0,311	0,303
5	6	0,552	0,455	0,466	0,401	0,415	0,392	0,552	0,473	0,000	0,552

Si comparamos estos resultados con los obtenidos al realizar flujos de cargas mediante Newton-Raphson, se obtienen sobrecargas en la línea 1-2 para todas las contingencias, incluidas las de las ramas 2-3, 2-4 y 2-5. Si analizamos los resultados más a fondo para estos casos, llegamos a los siguientes resultados:

Tabla 5-8 Comparativa contingencias líneas 2-3, 2-4, y 2-5 de la red de 14 nudos.

Origen	Destino	2-3			2-4			2-5		
		Pij FD	Pij (pu)	Pji (pu)	Pij FD	Pij	Pji	Pij FD	Pij	Pji
1	2	1,3207	1,5309	-1,4891	1,3167	1,4680	-1,4300	1,3204	1,4651	-1,4272
1	5	0,8490	0,9801	-0,9338	0,8530	0,9569	-0,9127	0,8505	0,9470	-0,9037
2	3	0,0000	0,0000	0,0000	0,8537	0,9166	-0,8806	0,7815	0,8350	-0,8051
2	4	0,8642	0,9651	-0,9161	0,0000	0,0000	0,0000	0,7219	0,7751	-0,7434
2	5	0,6396	0,7071	-0,6813	0,6461	0,6964	-0,6713	0,0000	0,0000	0,0000
3	4	-0,9419	-0,9411	1,0074	-0,0883	-0,0614	0,0616	-0,1604	-0,1369	0,1381
4	5	-0,9772	-1,0551	1,0707	-0,9871	-1,0266	1,0414	-0,3731	-0,3984	0,4006
6	11	0,0719	0,0908	-0,0899	0,0722	0,0897	-0,0888	0,0514	0,0655	-0,0650
6	12	0,0767	0,0803	-0,0794	0,0768	0,0801	-0,0793	0,0737	0,0774	-0,0766
6	13	0,1749	0,1853	-0,1832	0,1750	0,1848	-0,1826	0,1643	0,1722	-0,1703
7	8	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
7	9	0,2678	0,3104	-0,3104	0,2674	0,3115	-0,3115	0,2902	0,3363	-0,3363
9	10	0,0531	0,0354	-0,0353	0,0528	0,0365	-0,0364	0,0736	0,0602	-0,0601
9	14	0,0934	0,0842	-0,0832	0,0932	0,0849	-0,0839	0,1069	0,0998	-0,0986
10	11	-0,0369	-0,0547	0,0549	-0,0372	-0,0536	0,0538	-0,0164	-0,0299	0,0300
12	13	0,0157	0,0184	-0,0183	0,0158	0,0183	-0,0182	0,0127	0,0156	-0,0156
13	14	0,0556	0,0665	-0,0658	0,0558	0,0658	-0,0651	0,0421	0,0509	-0,0504
4	7	0,2678	0,3104	-0,3104	0,2674	0,3115	-0,3115	0,2902	0,3363	-0,3363
4	9	0,1537	0,1748	-0,1748	0,1535	0,1754	-0,1754	0,1665	0,1894	-0,1894
5	6	0,4355	0,4684	-0,4684	0,4360	0,4666	-0,4666	0,4015	0,4271	-0,4271

Podemos observar que para la contingencia de 2-3 utilizando los factores de distribución no se detectan sobrecargas, mientras que si empleamos el método de Newton-Raphson, que es más exacto, si se detectan en ambos extremos de la línea. Para las ramas 2-4 y 2-5 los factores de distribución tampoco detectan sobrecargas, sin embargo, con el flujo de carga en un extremo si se detectan.

A continuación, vamos a analizar el error cometido para el caso de la línea 2-3.

Tabla 5-9 Contingencia de la línea 2-3 de la red de 14 nudos.

Origen	Destino	Pij FD	Pij (pu)	Pji (pu)	Error (%)
1	2	1,3207	1,5309	-1,4891	12,535
1	5	0,8490	0,9801	-0,9338	11,278
2	3	0,0000	0,0000	0,0000	0,000
2	4	0,8642	0,9651	-0,9161	8,122
2	5	0,6396	0,7071	-0,6813	7,859
3	4	-0,9419	-0,9411	1,0074	3,319
4	5	-0,9772	-1,0551	1,0707	8,059

6	11	0,0719	0,0908	-0,0899	20,489
6	12	0,0767	0,0803	-0,0794	3,868
6	13	0,1749	0,1853	-0,1832	5,097
7	8	0,0000	0,0000	0,0000	0,000
7	9	0,2678	0,3104	-0,3104	13,713
9	10	0,0531	0,0354	-0,0353	50,339
9	14	0,0934	0,0842	-0,0832	11,589
10	11	-0,0369	-0,0547	0,0549	32,762
12	13	0,0157	0,0184	-0,0183	14,329
13	14	0,0556	0,0665	-0,0658	15,950
4	7	0,2678	0,3104	-0,3104	13,713
4	9	0,1537	0,1748	-0,1748	12,079
5	6	0,4355	0,4684	-0,4684	7,032

En este caso, el error de emplear un método u otro alcanza hasta el 50%, siendo la media de 12,6%. Los resultados obtenidos para las contingencias en líneas en una red de estas características no se aproximan tanto a los exactos. Esto puede tener consecuencias como hemos visto a la hora de detectar sobrecargas.

5.2 Red IEEE-39

En este apartado vamos a estudiar cómo se comportan los diferentes métodos al resolver los análisis N-1 para la red *IEEE-39*. Esta red, como podemos ver en la Figura 5-2, está compuesta por 10 generadores y 46 ramas, de las cuales 34 son líneas y 12 son transformadores. Además, esta red incorpora 18 cargas repartidas en los nudos. La tensión nominal de todo el sistema es de 345 kV. El límite utilizado para detectar sobrecargas será de 905 MW (9,05 en pu), y se obtiene de la interpolación de los límites térmicos conocidos: 528 MW para redes de 220 kV y 1070 MW para redes de 400 kV. Para las tensiones, los límites serán del $\pm 10\%$.

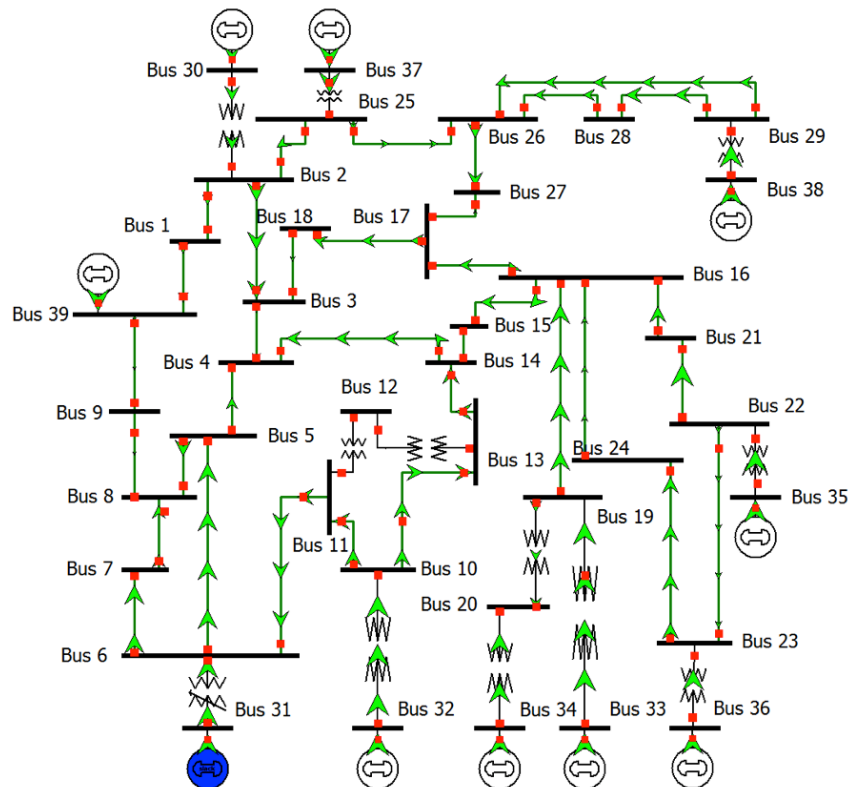


Figura 5-2. Esquema de la red IEEE-39.

En este caso, los resultados del flujo inicial obtenido son los siguientes:

Tabla 5-10 Flujo por las ramas utilizando Newton Raphson y DCLF para red de 39 nudos.

Origen	Destino	Pij (pu)	Pji (pu)	Pij (DCLF) (pu)	Error (%)	Qij (pu)	Qji (pu)
1	2	-1,1469	1,1511	-1,2315	7,182	-0,472	-0,2576
1	39	1,1469	-1,1456	1,2576	9,712	-0,700	-0,1025
2	3	3,6649	-3,6494	3,8361	4,893	-0,138	0,0303
2	25	-2,3160	2,3584	-2,5499	9,098	1,117	-1,2301
3	4	0,7814	-0,7807	1,0222	30,872	-0,294	0,0587
3	18	-0,3520	0,3523	-0,3956	12,347	0,252	-0,4869
4	5	-1,8610	1,8643	-1,2742	31,591	-1,132	1,0321
4	14	-2,7322	2,7377	-2,6486	3,158	0,390	-0,4567
5	6	-5,7372	5,7429	-4,3183	24,769	0,165	-0,1403
5	8	3,1045	-3,0967	3,1342	1,084	1,176	-1,2345
6	7	4,3681	-4,3573	4,1359	5,198	1,254	-1,2165
6	11	-3,3407	3,3491	-3,7035	10,722	1,559	-1,6190
7	8	2,0193	-2,0178	1,8001	10,822	0,388	-0,4585
8	9	-0,1055	0,1056	-0,2787	163,992	-0,072	-0,3513
9	39	-0,1056	0,1056	-0,2528	139,413	-0,825	-0,5124
10	11	3,3760	-3,3715	3,6948	9,516	-1,122	1,0874
10	13	3,1240	-3,1205	2,8069	10,101	0,279	-0,3232
13	14	3,0677	-3,0601	2,7284	10,949	-0,055	-0,0529
14	15	0,3224	-0,3214	0,0884	72,527	0,510	-0,9000
15	16	-2,8786	2,8857	-3,1038	7,691	-0,624	0,5119
16	17	2,0505	-2,0476	2,0486	0,022	-0,594	0,4826
16	19	-4,5058	4,5354	-4,6046	1,858	-0,021	0,0445
16	21	-3,2974	3,3057	-3,3631	1,865	0,505	-0,6448
16	24	-0,4269	0,4271	-0,4647	8,826	-0,744	0,6725
17	18	1,9347	-1,9323	1,9703	1,907	-0,301	0,1831
17	27	0,1129	-0,1129	0,0873	22,711	-0,186	-0,1693
21	22	-6,0457	6,0726	-6,0954	0,599	-0,495	0,6838
22	23	0,4274	-0,4272	0,4111	3,779	0,399	-0,6003
23	24	3,5381	-3,5131	3,5443	0,530	-0,262	0,2590
25	26	0,7858	-0,7840	0,6208	20,904	-0,245	-0,3182
26	27	2,7066	-2,6971	2,7138	0,442	0,419	-0,5877
26	28	-1,4083	1,4163	-1,4737	4,351	-0,114	-0,6729
26	29	-1,9042	1,9234	-1,9675	2,805	-0,153	-0,7875
28	29	-3,4763	3,4918	-3,5175	0,960	0,394	-0,5031
2	30	-2,5000	2,5000	-2,5000	0,000	-0,723	0,8321
6	31	-6,7703	6,7703	-4,7477	29,875	4,513	-3,0789
10	32	-6,5000	6,5000	-6,5000	0,000	0,745	0,0153
11	12	0,0224	-0,0222	-0,0064	128,578	0,366	-0,3610
12	13	-0,0528	0,0528	-0,0814	54,137	-0,225	0,2269
19	20	1,7597	-1,7442	1,7200	1,825	4,655	-4,3486
19	33	-6,2951	6,3200	-6,3200	0,197	-0,192	0,6967
20	34	-5,0558	5,0800	-5,0800	0,239	-1,004	1,4879
22	35	-6,5000	6,5000	-6,5000	0,000	-1,113	1,6704

23	36	-5,5859	5,6000	-5,6000	0,126	0,013	0,7545
25	37	-5,3842	5,4000	-5,4000	0,147	0,965	-0,3535
29	38	-8,2503	8,3000	-8,3000	0,301	0,975	-0,0047

Tabla 5-11 Tensiones y potencias nodales utilizando Newton Raphson para red de 39 nudos.

Nudos	Tensión nodal			Potencia nodal	
	V (pu)	Alpha (rad)	Alpha (°)	P (pu)	Q (pu)
1	1,0518	-0,19958631	-11,4354534	0	-1,17260041
2	1,0599	-0,15755998	-9,02752215	0	-0,00116248
3	1,0566	-0,20698852	-11,8595688	-3,22	-0,01174531
4	1,0592	-0,22205981	-12,7230898	-5	-0,68328903
5	1,0736	-0,2018541	-11,5653881	0	2,37246027
6	1,0743	-0,18888765	-10,8224653	0	7,18492164
7	1,0612	-0,22345028	-12,8027581	-2,338	-0,82816591
8	1,0586	-0,2315649	-13,2676915	-5,22	-1,76513649
9	1,054	-0,22784086	-13,0543196	0	-1,17612674
10	1,0611	-0,15068589	-8,63366559	0	-0,09779266
11	1,0643	-0,16392331	-9,39211359	0	-0,16548024
12	1,0493	-0,16427236	-9,41211305	-0,075	-0,58577393
13	1,0587	-0,16253012	-9,31228988	0	-0,15125156
14	1,0561	-0,19021132	-10,8983057	0	6,0549E-05
15	1,0409	-0,19540689	-11,19599	-3,2	-1,52420767
16	1,0485	-0,17104974	-9,80042833	-3,294	-0,34244525
17	1,0517	-0,18793039	-10,767618	0	-0,00452638
18	1,0523	-0,20240994	-11,5972351	-1,58	-0,30378374
19	1,056	-0,09139922	-5,23678968	0	4,50799729
20	0,9942	-0,11142757	-6,3843297	-6,8	-5,35261111
21	1,0436	-0,12988421	-7,44181729	-2,74	-1,13984105
22	1,0561	-0,05327233	-3,05227981	0	-0,02997322
23	1,0513	-0,05669656	-3,24847366	-2,475	-0,84879098
24	1,0526	-0,16895941	-9,680661	-3,086	0,93144611
25	1,0658	-0,13249404	-7,59134939	-2,24	-0,51057583
26	1,0623	-0,15478235	-8,86837543	-1,39	-0,16619256
27	1,0517	-0,18970647	-10,8693801	-2,81	-0,75693707
28	1,0554	-0,09395347	-5,38313729	-2,06	-0,27900618
29	1,0536	-0,04605857	-2,63896149	-2,835	-0,31593902
30	1,07309612	-0,11776488	-6,74743035	2,5	0,83211
31	0,982	-0,02775074	-1,59	6,77034904	-3,07888406
32	1,05420086	-0,03420729	-1,95993336	6,49999997	0,01533006
33	1,06610494	-0,01203383	-0,68948753	6,31999999	0,69667005
34	1,02098534	-0,02254681	-1,29183714	5,08	1,4879
35	1,07477823	0,02870845	1,64487315	6,5	1,67043
36	1,06347644	0,07962717	4,5623007	5,6	0,75449
37	1,05442976	-0,02059415	-1,17995777	5,4	-0,35347
38	1,05263248	0,07095992	4,0657037	8,3	-0,00473
39	1,0578561	-0,22561517	-12,9267969	-1,04	-0,61487

Como vemos, tanto las ramas como los nudos se encuentran inicialmente dentro de los límites de sobrecarga y de tensión. El error medio cometido empleando DCLF para los flujos es del 18,753%.

Tabla 5-12 Contingencias de los generadores de la red de 39 nudos.

Origen	Destino	30	32	33	34	35	36	37	38	39
1	2	-0,6241	-0,9999	-0,4745	-0,6064	-0,4558	-0,5515	-0,0735	0,1757	-5,1274
1	39	0,6513	1,0468	0,5394	0,6586	0,5236	0,6100	0,1336	-0,0715	5,2380
2	3	2,1613	3,8745	3,8715	3,8310	3,8805	3,8508	0,8229	1,6560	0,7708
2	25	-2,7687	-2,3429	-1,7995	-1,9008	-1,7874	-1,8607	1,6458	1,0983	-3,3238
3	4	-0,4339	0,9046	-1,0859	-0,7195	-1,1327	-0,8674	-1,7685	-2,6718	-1,4215
3	18	-0,6282	-0,2447	1,7516	1,3389	1,8088	1,5095	-0,6173	1,1402	-0,9980
4	5	-2,9483	-2,9557	-4,6573	-4,1086	-4,7293	-4,3318	-4,2105	-5,4413	-3,6384
4	14	-2,8306	-1,4493	-1,7283	-1,9253	-1,7008	-1,8437	-2,8683	-2,5046	-3,0508
5	6	-6,8992	-6,6254	-8,3998	-7,8774	-8,4668	-8,0885	-8,2179	-9,3406	-10,0132
5	8	3,2194	3,0012	3,0722	3,0786	3,0700	3,0747	3,3224	3,2585	5,7642
6	7	4,6795	4,4503	4,8417	4,7488	4,8524	4,7852	5,0106	5,1691	7,3294
6	11	-2,7448	1,3968	-1,2198	-1,6359	-1,1648	-1,4663	-2,0187	-1,1311	-2,2168
7	8	2,3329	2,1054	2,4984	2,4044	2,5093	2,4414	2,6667	2,8289	4,9892
8	9	0,3303	-0,1099	0,3591	0,2679	0,3686	0,3028	0,7759	0,8863	5,5526
9	39	0,3553	-0,0659	0,4191	0,3162	0,4313	0,3568	0,8311	0,9813	5,6572
10	11	2,8315	-1,2317	1,4404	1,8202	1,3900	1,6652	2,1680	1,3564	2,3446
10	13	3,6703	1,2349	5,0641	4,6835	5,1147	4,8389	4,3361	5,1507	4,1623
13	14	3,6711	1,3186	5,2072	4,7875	5,2632	4,9590	4,4064	5,3068	4,2204
14	15	0,8371	-0,1268	3,4898	2,8684	3,5744	3,1239	1,5464	2,8270	1,1928
15	16	-2,3548	-3,3118	0,3118	-0,3141	0,3976	-0,0562	-1,6343	-0,3377	-1,9743
16	17	2,6321	1,7185	-0,9320	-0,3469	-1,0180	-0,5931	3,4236	4,8227	3,1680
16	19	-4,5113	-4,5155	1,8001	0,5629	-4,5206	-4,5185	-4,5181	-4,5279	-4,5262
16	21	-3,3164	-3,3306	-3,3457	-3,3363	0,8597	-0,4052	-3,3396	-3,3731	-3,3672
16	24	-0,4435	-0,4559	-0,4690	-0,4607	1,8202	2,1983	-0,4638	-0,4930	-0,4878
17	18	2,2046	1,8164	-0,1846	0,2312	-0,2426	0,0590	2,1860	0,4172	2,5573
17	27	0,4356	-0,0819	-0,7230	-0,5590	-0,7496	-0,6303	1,2591	4,4465	0,6481
21	22	-6,0552	-6,0624	-6,0700	-6,0653	-1,8632	-3,1316	-6,0669	-6,0838	-6,0808
22	23	0,4260	0,4250	0,4239	0,4246	-1,8680	3,3605	0,4243	0,4219	0,4223
23	24	3,5468	3,5533	3,5603	3,5559	1,2700	0,8949	3,5575	3,5729	3,5702
25	26	0,3459	0,7809	1,3336	1,2261	1,3471	1,2693	-0,6237	4,2517	-0,1740
26	27	2,3727	2,8821	3,5147	3,3561	3,5399	3,4246	1,5352	-1,6733	2,1303
26	28	-1,4372	-1,4572	-1,4790	-1,4652	-1,4822	-1,4720	-1,4732	2,6152	-1,5120
26	29	-1,9275	-1,9436	-1,9612	-1,9500	-1,9637	-1,9555	-1,9565	2,1439	-1,9878
28	29	-3,4819	-3,4859	-3,4901	-3,4874	-3,4908	-3,4888	-3,4890	0,6487	-3,4966
2	30	0,0000	-2,5000	-2,5000	-2,5000	-2,5000	-2,5000	-2,5000	-2,5000	-2,5000
6	31	-8,8364	-12,4724	-12,0195	-10,9896	-12,1518	-11,4060	-11,2084	-13,3717	-15,1191
10	32	-6,5000	0,0000	-6,5000	-6,5000	-6,5000	-6,5000	-6,5000	-6,5000	-6,5000
11	12	0,0763	0,1568	0,2140	0,1764	0,2190	0,1917	0,1420	0,2224	0,1247
12	13	0,0012	0,0816	0,1388	0,1012	0,1438	0,1166	0,0669	0,1472	0,0495
19	20	1,7597	1,7597	1,7597	6,8397	1,7597	1,7597	1,7597	1,7597	1,7597
19	33	-6,2951	-6,2951	0,0249	-6,2951	-6,2951	-6,2951	-6,2951	-6,2951	-6,2951

20	34	-5,0558	-5,0558	-5,0558	0,0242	-5,0558	-5,0558	-5,0558	-5,0558	-5,0558
22	35	-6,5000	-6,5000	-6,5000	-6,5000	0,0000	-6,5000	-6,5000	-6,5000	-6,5000
23	36	-5,5859	-5,5859	-5,5859	-5,5859	-5,5859	0,0141	-5,5859	-5,5859	-5,5859
25	37	-5,3842	-5,3842	-5,3842	-5,3842	-5,3842	-5,3842	0,0158	-5,3842	-5,3842
29	38	-8,2503	-8,2503	-8,2503	-8,2503	-8,2503	-8,2503	-8,2503	0,0497	-8,2503

En la Tabla 5-12 vemos que la línea 5-6 que inicialmente estaba a un 63,5% de su capacidad, alcanza el 103% de carga cuando se desconecta el generador del Bus 38, y el 110% cuando se desconecta el del Bus 39. Además, se detectan sobrecargas en la línea 6-31 en todos los casos, a excepción de cuando se desconecta el generador del Bus 30. En ese caso, los cálculos empleando factores de distribución indican una carga de la línea 6-31 del 97,7%, por lo que no se detecta sobrecarga.

Como la línea tiene un flujo muy cercano a su límite, vamos a comparar cual sería el flujo real mediante un flujo de cargas con Newton-Raphson si desconectamos el generador del nudo 30.

Tabla 5-13 Contingencia del generador 30 de la red de 39 nudos.

Origen	Destino	Pij FD NR (pu)	Error (%)	Pij FD DCLF (pu)	Error DCLF (%)	Pij (pu)	Pji (pu)
1	2	-0,6241	0,811	-0,7087	14,477	-0,6184	0,6197
1	39	0,6513	5,349	0,7620	23,253	0,6184	-0,618
2	3	2,1613	5,181	2,3325	13,513	2,0573	-2,0524
2	25	-2,7687	2,302	-3,0026	10,942	-2,677	2,7359
3	4	-0,4339	25,112	-0,1932	66,664	-0,5792	0,5796
3	18	-0,6282	6,725	-0,6718	14,129	-0,5884	0,5889
4	5	-2,9483	5,894	-2,3615	24,624	-3,1292	3,1368
4	14	-2,8306	0,114	-2,7469	2,845	-2,8244	2,8303
5	6	-6,8992	3,662	-5,4803	23,475	-7,157	7,1659
5	8	3,2194	0,869	3,2491	0,047	3,2518	-3,2434
6	7	4,6795	1,392	4,4474	6,284	4,7519	-4,7393
6	11	-2,7448	4,055	-3,1077	17,810	-2,635	2,6407
7	8	2,3329	2,804	2,1137	11,937	2,4013	-2,3992
8	9	0,3303	21,806	0,1571	62,796	0,4226	-0,4222
9	39	0,3553	15,831	0,2080	50,713	0,4222	-0,422
10	11	2,8315	3,786	3,1503	15,472	2,7297	-2,7267
10	13	3,6703	2,585	3,3532	11,003	3,7703	-3,7652
13	14	3,6711	2,629	3,3318	11,628	3,7759	-3,7645
14	15	0,8371	10,296	0,6031	35,369	0,9342	-0,9321
15	16	-2,3548	3,727	-2,5800	13,648	-2,2679	2,2725
16	17	2,6321	1,098	2,6302	1,170	2,6637	-2,659
16	19	-4,5113	0,205	-4,6101	1,980	-4,5058	4,5354
16	21	-3,3164	0,449	-3,3821	2,438	-3,2974	3,3057
16	24	-0,4435	3,848	-0,4812	12,704	-0,4269	0,4271
17	18	2,2046	1,576	2,2402	3,218	2,1719	-2,1689
17	27	0,4356	10,552	0,4099	15,823	0,4871	-0,4868
21	22	-6,0552	0,065	-6,1050	0,757	-6,0457	6,0726
22	23	0,426	0,297	0,4098	4,107	0,4274	-0,4272
23	24	3,5468	0,601	3,5530	0,777	3,5381	-3,5131
25	26	0,3459	15,238	0,1809	55,655	0,4083	-0,4078
26	27	2,3727	1,974	2,3799	2,282	2,3304	-2,3232
26	28	-1,4372	1,761	-1,5026	6,393	-1,4083	1,4163

26	29	-1,9275	0,712	-1,9908	4,021	-1,9042	1,9234
28	29	-3,4819	0,061	-3,5232	1,122	-3,4763	3,4918
2	30	0	0	0,0000	0	0	0
6	31	-8,8364	4,809	-6,8138	26,599	-9,2829	9,2829
10	32	-6,5	0	-6,5000	0,000	-6,5	6,5
11	12	0,0763	11,126	0,0475	44,670	0,086	-0,0858
12	13	0,0012	89,304	-0,0275	355,548	0,0108	-0,0107
19	20	1,7597	0,444	1,7200	1,824	1,7597	-1,7442
19	33	-6,2951	0,197	-6,3200	0,197	-6,2951	6,32
20	34	-5,0558	0,239	-5,0800	0,239	-5,0558	5,08
22	35	-6,5	0	-6,5000	0	-6,5	6,5
23	36	-5,5859	0,126	-5,6000	0,126	-5,5859	5,6
25	37	-5,3842	0,147	-5,4000	0,147	-5,3842	5,4
29	38	-8,2503	0,301	-8,3000	0,300	-8,2503	8,3

Si comparamos los resultados de la Tabla 5-13, donde se resuelve la contingencia mediante factores de distribución y mediante un flujo de cargas con Newton-Raphson, vemos que el flujo de cargas si detecta sobrecarga en la línea 6-31 cuando se desconecta el generador del nudo 30, mientras que los factores de distribución no lo hacen.

En ese caso, el error medio que se ha cometido partiendo de un flujo inicial con Newton-Raphson es del 5,8%. Cuando partimos de los flujos calculados a partir de un flujo de continua, el error medio asciende hasta 21,1%.

Con este caso hemos llegado a la conclusión de que, aunque partimos de unos flujos exactos, el error cometido cuando los flujos se encuentran rozando el límite, es decisivo para su detección.

Como observamos en la misma tabla, a pesar de que los errores medios son los que hemos comentado, los valores para cada caso son muy diferentes, existiendo casos en los que se alcanza hasta un 80%.

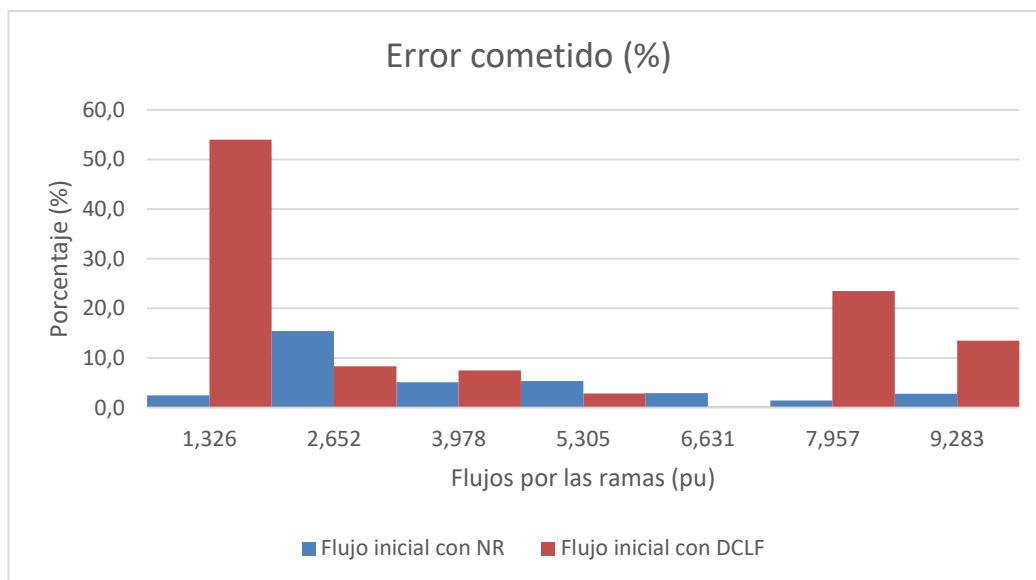


Figura 5-3. Errores cometidos en contingencia del generador 30 para red de 39 nudos.

En el gráfico de la Figura 5-3, vemos con más claridad cómo, para flujos cercanos valor límite, para que se produzcan sobrecargas (9,05 pu) el error medio cometido partiendo de DCLF es mayor que el cometido partiendo de Newton-Raphson. También vemos como para ramas con flujos menores, los errores medios aumentan en ambos métodos, aunque esta tendencia se acentúa cuando partimos de un flujo de continua.

Si atendemos a los resultados más relevantes para las contingencias en las líneas, podemos destacar las contingencias de las líneas 6-7, 16-19, 21-22 y 23-24.

Tabla 5-14 Comparativa contingencias líneas 6-7 y 16-19 de la red de 39 nudos.

Origen	Destino	6-7				16-19			
		Pij FD	Pij (pu)	Pji (pu)	Error (%)	Pij FD	Pij (pu)	Pji (pu)	Error (%)
1	2	-1,5143	-1,4421	1,4487	4,767	-0,7389	-0,6653	0,6668	10,926
1	39	1,5460	1,4421	-1,4401	7,281	0,8108	0,6653	-0,6649	21,907
2	3	3,6285	3,4271	-3,4135	6,088	3,9824	3,7074	-3,6915	7,650
2	25	-2,6212	-2,3757	2,4207	9,300	-2,1678	-1,8742	1,9003	14,868
3	4	0,8788	0,6034	-0,6029	45,695	-0,3538	-0,7882	0,7889	55,138
3	18	-0,4577	-0,4099	0,4102	11,620	1,1475	1,2596	-1,2580	8,845
4	5	-1,2372	-1,8560	1,8592	33,399	-3,3317	-4,1676	4,1805	20,181
4	14	-2,8253	-2,9151	2,9213	3,182	-1,9125	-1,9953	1,9983	4,221
5	6	-8,1073	-9,8251	9,8419	17,554	-6,2800	-8,0798	8,0912	22,331
5	8	6,9663	7,1975	-7,1606	2,963	3,1128	3,1310	-3,1230	0,455
6	7	0,0000	0,0000	0,0000	0,000	4,4868	4,8258	-4,8128	6,899
6	11	-3,4326	-3,0372	3,0444	12,884	-2,1437	-1,6297	1,6326	31,423
7	8	-2,3357	-2,3380	2,3402	0,147	2,1548	2,4748	-2,4726	12,891
8	9	-0,5807	-0,3996	0,4000	45,255	0,0671	0,3756	-0,3753	82,129
9	39	-0,5491	-0,4000	0,4001	37,250	0,1354	0,3753	-0,3751	63,917
10	11	3,4478	3,0980	-3,0941	11,361	2,2714	1,8105	-1,8090	25,508
10	13	3,0542	3,4020	-3,3979	10,170	4,2334	4,6895	-4,6817	9,650
13	14	3,0007	3,3724	-3,3633	10,900	4,3014	4,7828	-4,7644	9,893
14	15	0,1858	0,4420	-0,4409	57,921	2,4142	2,7662	-2,7533	12,520
15	16	-3,0049	-2,7591	2,7657	8,779	-0,7621	-0,4467	0,4474	70,451
16	17	2,1573	2,1705	-2,1673	0,534	-0,1316	-0,0170	0,0171	670,044
16	19	-4,6055	-4,5058	4,5354	1,879	0,0000	0,0000	0,0000	0,000
16	21	-3,3663	-3,2974	3,3057	1,962	-3,3966	-3,2974	3,3057	2,880
16	24	-0,4675	-0,4269	0,4271	9,482	-0,4939	-0,4269	0,4271	15,661
17	18	2,0313	1,9928	-1,9902	2,001	0,4163	0,3220	-0,3220	29,280
17	27	0,1369	0,1745	-0,1745	21,570	-0,5198	-0,3392	0,3393	53,225
21	22	-6,0971	-6,0457	6,0726	0,626	-6,1124	-6,0457	6,0726	0,879
22	23	0,4109	0,4274	-0,4272	3,833	0,4087	0,4274	-0,4272	4,355
23	24	3,5457	3,5381	-3,5131	0,572	3,5597	3,5381	-3,5131	0,968
25	26	0,5517	0,7235	-0,7221	23,667	1,0249	1,2439	-1,2396	17,464
26	27	2,6623	2,6446	-2,6355	0,842	3,3013	3,1621	-3,1493	4,615
26	28	-1,4785	-1,4083	1,4163	4,686	-1,5237	-1,4083	1,4163	7,887
26	29	-1,9713	-1,9042	1,9234	3,004	-2,0078	-1,9042	1,9234	4,908
28	29	-3,5184	-3,4763	3,4918	0,987	-3,5273	-3,4763	3,4918	1,241
2	30	-2,5000	-2,5000	2,5000	0,000	-2,5000	-2,5000	2,5000	0,000
6	31	-4,6713	-6,8047	6,8047	31,351	-8,6145	-11,2873	11,2873	23,680
10	32	-6,5000	-6,5000	6,5000	0,000	-6,5000	-6,5000	6,5000	0,000
11	12	0,0180	0,0498	-0,0496	63,673	0,1345	0,1764	-0,1762	23,734
12	13	-0,0570	-0,0254	0,0255	123,752	0,0595	0,1012	-0,1011	41,209
19	20	1,7200	1,7597	-1,7442	1,825	4,9357	-4,9664	4,2566	207,031
19	33	-6,3200	-6,2951	6,3200	0,197	-5,8579	-2,3915	6,3474	34,065

20	34	-5,0800	-5,0558	5,0800	0,239	-4,8402	-0,4287	2,9285	188,346
22	35	-6,5000	-6,5000	6,5000	0,000	-6,5000	-6,5000	6,5000	0,000
23	36	-5,6000	-5,5859	5,6000	0,126	-5,6000	-5,5859	5,6000	0,126
25	37	-5,4000	-5,3842	5,4000	0,147	-5,4000	-5,3842	5,4000	0,147
29	38	-8,3000	-8,2503	8,3000	0,301	-8,3000	-8,2503	8,3000	0,301

En primer lugar, vamos a analizar los resultados obtenidos para la contingencia de la línea 6-7. Como vemos, todos los flujos se encuentran dentro de límite, a excepción de la línea 5-6. En ese caso, mediante el flujo de cargas se identifica una sobrecarga media entre los dos extremos del 108,7%, mientras que mediante factores de distribución no logramos identificar la sobrecarga, obteniendo como resultado que la línea se encuentra al 89,6%. En este caso, el error cometido es del 17%. Vuelve a ser decisivo este error para detectar la única sobrecarga que se produce.

En el caso del análisis de la contingencia de la línea 16-19 vemos que ocurre algo similar. Esta vez, el error cometido 23,68%. La línea realmente alcanza el 125% de su capacidad, mientras que mediante factores de distribución vemos que no se consigue detectar la sobrecarga.

Tabla 5-15 Comparativa contingencias líneas 6-7 y 16-19 de la red de 39 nudos.

Origen	Destino	21-22				23-24			
		Pij FD	Pij (pu)	Pji (pu)	Error (%)	Pij FD	Pij (pu)	Pji (pu)	Error (%)
1	2	-1,2306	-1,1296	1,1336	8,749	-1,2311	-1,1417	1,1459	7,636
1	39	1,2547	1,1296	-1,1284	11,140	1,2563	1,1417	-1,1405	10,093
2	3	3,8303	3,6665	-3,6510	4,688	3,8333	3,6654	-3,6499	4,802
2	25	-2,5448	-2,3002	2,3419	9,643	-2,5475	-2,3113	2,3535	9,222
3	4	1,0102	0,7249	-0,7243	39,420	1,0165	0,7645	-0,7638	33,028
3	18	-0,3906	-0,2939	0,2942	32,842	-0,3934	-0,3346	0,3349	17,507
4	5	-1,2885	-1,9440	1,9474	33,777	-1,2809	-1,8858	1,8892	32,138
4	14	-2,6466	-2,7057	2,7111	2,283	-2,6477	-2,7243	2,7298	2,909
5	6	-4,3350	-5,8213	5,8272	25,571	-4,3261	-5,7624	5,7681	24,962
5	8	3,1368	3,1055	-3,0977	1,137	3,1355	3,1048	-3,0970	1,116
6	7	4,1412	4,3845	-4,3736	5,431	4,1385	4,3730	-4,3622	5,246
6	11	-3,6935	-3,2793	3,2875	12,491	-3,6988	-3,3223	3,3306	11,194
7	8	1,8052	2,0356	-2,0341	11,286	1,8025	2,0242	-2,0226	10,917
8	9	-0,2716	-0,0883	0,0883	207,584	-0,2753	-0,1004	0,1004	174,199
9	39	-0,2476	-0,0883	0,0884	180,248	-0,2503	-0,1004	0,1005	149,232
10	11	3,6859	3,3197	-3,3154	11,101	3,6906	3,3591	-3,3547	9,940
10	13	2,8156	3,1803	-3,1766	11,415	2,8110	3,1409	-3,1373	10,452
13	14	2,7377	3,1293	-3,1215	12,403	2,7328	3,0861	-3,0785	11,340
14	15	0,0988	0,4103	-0,4093	75,889	0,0932	0,3487	-0,3477	73,232
15	16	-3,0945	-2,7907	2,7975	10,750	-3,0995	-2,8523	2,8593	8,535
16	17	2,0507	1,9757	-1,9730	3,870	2,0498	2,0281	-2,0253	1,143
16	19	-4,6039	-4,5058	4,5354	1,844	-4,6043	-4,5058	4,5354	1,851
16	21	2,7329	2,7455	-2,7400	0,362	-6,9057	-6,7644	6,7985	1,832
16	24	-6,5561	-6,3069	6,3177	3,862	3,0796	3,0888	-3,0860	0,252
17	18	1,9660	1,8764	-1,8742	4,835	1,9684	1,9173	-1,9149	2,730
17	27	0,0927	0,0966	-0,0966	4,037	0,0899	0,1080	-0,1080	16,739
21	22	0,0000	0,0000	0,0000	0,000	-9,6387	-9,5385	9,6054	0,697
22	23	6,5058	6,5000	-6,4772	0,265	-3,1328	-3,1054	3,1109	0,795

23	24	9,6367	9,5881	-9,4037	1,482	0,0000	0,0000	0,0000	0,000
25	26	0,6248	0,8023	-0,8005	22,036	0,6227	0,7907	-0,7890	21,161
26	27	2,7094	2,7230	-2,7134	0,325	2,7116	2,7115	-2,7020	0,179
26	28	-1,4716	-1,4083	1,4163	4,197	-1,4727	-1,4083	1,4163	4,276
26	29	-1,9658	-1,9042	1,9234	2,714	-1,9667	-1,9042	1,9234	2,761
28	29	-3,5171	-3,4763	3,4918	0,948	-3,5173	-3,4763	3,4918	0,954
2	30	-2,5000	-2,5000	2,5000	0,000	-2,5000	-2,5000	2,5000	0,000
6	31	-4,7799	-6,9324	6,9324	31,049	-4,7629	-6,8188	6,8188	30,151
10	32	-6,5000	-6,5000	6,5000	0,000	-6,5000	-6,5000	6,5000	0,000
11	12	-0,0055	0,0280	-0,0278	119,778	-0,0060	0,0241	-0,0239	124,912
12	13	-0,0805	-0,0472	0,0473	70,328	-0,0810	-0,0511	0,0512	58,329
19	20	1,7200	1,7597	-1,7442	1,825	1,7200	1,7597	-1,7442	1,825
19	33	-6,3200	-6,2951	6,3200	0,197	-6,3200	-6,2951	6,3200	0,197
20	34	-5,0800	-5,0558	5,0800	0,239	-5,0800	-5,0558	5,0800	0,239
22	35	-6,5000	-6,5000	6,5000	0,000	-6,5000	-6,5000	6,5000	0,000
23	36	-5,6000	-5,5859	5,6000	0,126	-5,6000	-5,5859	5,6000	0,126
25	37	-5,4000	-5,3842	5,4000	0,147	-5,4000	-5,3842	5,4000	0,147
29	38	-8,3000	-8,2503	8,3000	0,301	-8,3000	-8,2503	8,3000	0,301

Para el caso de la contingencia de la línea 21-22 ocurre lo contrario a lo que ocurría para las contingencias anteriores. Ahora ambos métodos detectan satisfactoriamente la sobrecarga. Además, vemos que los factores de distribución para el caso de la sobrecarga comenten un error bastante aceptable, del 1,482%. Para el caso de la desconexión de la línea 23-24 ocurre lo mismo. Ambos métodos detectan la sobrecarga. El error cometido entre los dos métodos es de 0,697% para la línea donde se produce la sobrecarga. Sin embargo, también vemos que para el resto de líneas se cometen errores relativos muy distintos.

La media de los errores cometidos para el cálculo de las contingencias de estas cuatro líneas es del 23,5%, aunque apreciamos que el error para líneas muy poco cargadas es más grande. En el siguiente gráfico (Figura 5-4) se muestra gráficamente como el error en ramas que soportan flujos inferiores a 1 pu se dispara.

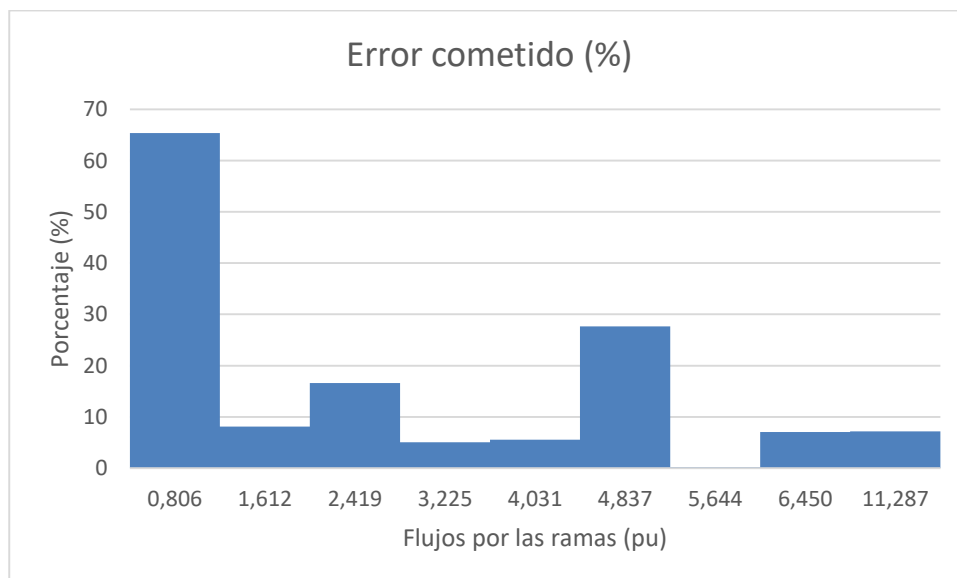


Figura 5-4. Errores cometidos en contingencia de las líneas 6-7, 16-19, 21-22 y 23-24 para red de 39 nudos.

Si tomamos solo en cuenta los errores cometidos para líneas que se encuentran con más del 50% de su capacidad, el error medio cometido es del 4,8%. Este resultado indica que, para valores de carga de las ramas altos, en este caso el error se reduce. Sin embargo, el valor de este error parece no ser solo función de este parámetro. Esto dificulta la decisión de emplear un método u otro y llegar a una conclusión firme.

5.3 Red IEEE-118

A continuación, vamos a estudiar los resultados del análisis N-1 mediante factores de distribución para la red *IEEE-118*. Esta red representa una aproximación simple del sistema American Electric Power (en el medio oeste de EE. UU.) a partir de diciembre de 1962. Este sistema contiene 19 generadores, 35 condensadores síncronos, 177 líneas, 9 transformadores y 91 cargas.

Esta red tiene dos niveles de tensión: 345 kV y 138 kV. Los límites de sobrecarga en este caso van a ser de 120,81 MW para la zona de 138 kV y 904,38 MW para la zona de 345 kV.

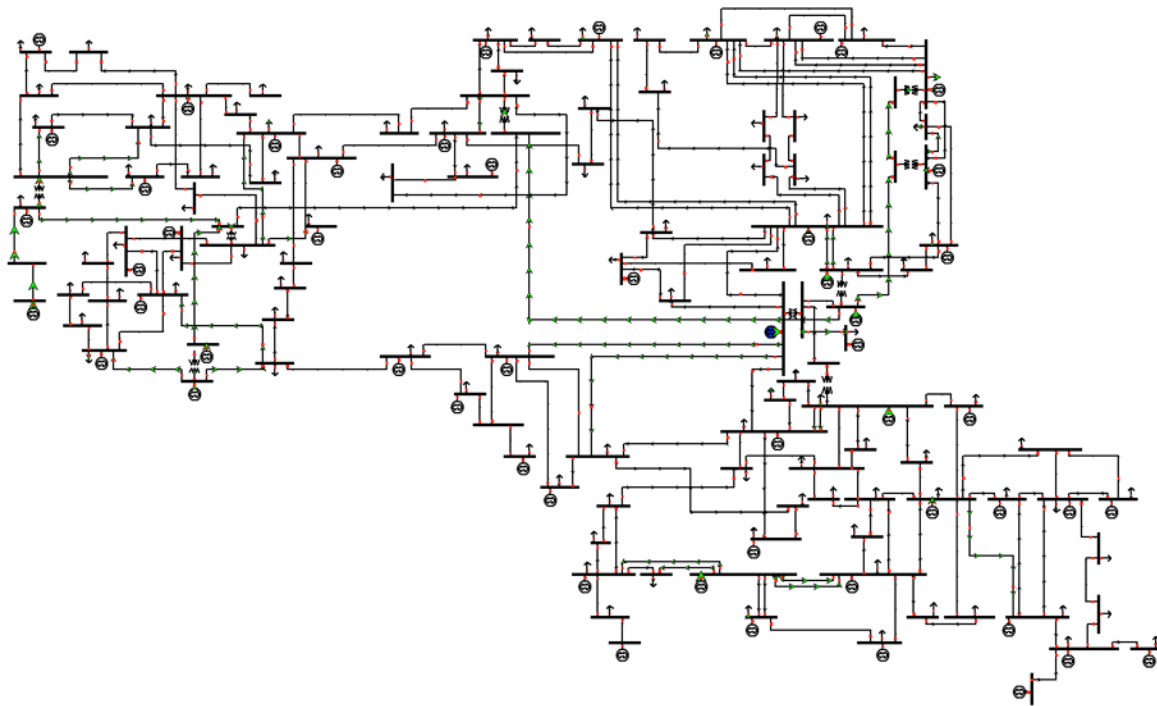


Figura 5-5. Esquema de la red IEEE-118.

En la Figura 5-5 apreciamos la complejidad de esta red. Debido a esto, se comprueba que el método de Newton-Raphson no logra converger. Por ello, vamos a realizar los análisis únicamente empleando factores de distribución. Veremos en qué casos debemos tener cierto cuidado para detectar las sobrecargas.

A continuación, se muestran los resultados de los flujos de por las ramas para el caso inicial y para las contingencias más relevantes.

Tabla 5-16 Flujos por las líneas para contingencias más relevantes de la red de 118 nudos.

Origen	Destino	DCLF (pu)	Generadores			Líneas				
			49	103	111	49-66	49-66	89-92	100-104	100-106
1	2	-0,1176	-0,1172	-0,1176	-0,1176	-0,1175	-0,1175	-0,1176	-0,1176	-0,1176
1	3	-0,3922	-0,3925	-0,3922	-0,3922	-0,3924	-0,3924	-0,3923	-0,3922	-0,3922
2	12	-0,3175	-0,3169	-0,3175	-0,3175	-0,3174	-0,3174	-0,3174	-0,3175	-0,3175
3	5	-0,6902	-0,6908	-0,6902	-0,6902	-0,6906	-0,6906	-0,6903	-0,6902	-0,6902
3	12	-0,0917	-0,0912	-0,0917	-0,0917	-0,0916	-0,0916	-0,0916	-0,0917	-0,0917
4	5	-1,0375	-1,0391	-1,0375	-1,0375	-1,0381	-1,0381	-1,0377	-1,0375	-1,0375
4	11	0,6475	0,6492	0,6476	0,6475	0,6481	0,6481	0,6478	0,6475	0,6475
5	6	0,8715	0,8728	0,8715	0,8715	0,8720	0,8720	0,8717	0,8715	0,8715
5	11	0,7746	0,7765	0,7746	0,7746	0,7753	0,7753	0,7749	0,7746	0,7746
6	7	0,3515	0,3529	0,3516	0,3516	0,3520	0,3520	0,3518	0,3515	0,3515

7	12	0,1616	0,1630	0,1616	0,1616	0,1621	0,1621	0,1618	0,1616	0,1616
8	9	-4,4852	-4,5002	-4,4859	-4,4858	-4,4812	-4,4812	-4,4901	-4,4852	-4,4852
8	30	0,8161	0,8311	0,8169	0,8169	0,8084	0,8084	0,8220	0,8161	0,8161
9	10	-4,4930	-4,4982	-4,4932	-4,4932	-4,4916	-4,4916	-4,4947	-4,4930	-4,4930
11	12	0,3590	0,3602	0,3591	0,3591	0,3595	0,3595	0,3593	0,3590	0,3590
11	13	0,3633	0,3658	0,3633	0,3633	0,3641	0,3641	0,3637	0,3633	0,3633
12	14	0,1977	0,2007	0,1978	0,1978	0,1987	0,1987	0,1982	0,1977	0,1977
12	16	0,0943	0,0958	0,0944	0,0944	0,0943	0,0943	0,0948	0,0943	0,0943
12	117	0,1999	0,1997	0,1999	0,1999	0,1999	0,1999	0,1998	0,1999	0,1999
13	15	0,0236	0,0264	0,0237	0,0237	0,0244	0,0244	0,0241	0,0236	0,0236
14	15	0,0580	0,0613	0,0581	0,0581	0,0589	0,0589	0,0586	0,0580	0,0580
15	17	-1,0390	-1,0486	-1,0390	-1,0390	-1,0451	-1,0451	-1,0389	-1,0390	-1,0390
15	19	0,1343	0,1372	0,1344	0,1344	0,1372	0,1372	0,1345	0,1343	0,1343
15	33	0,0873	0,1008	0,0874	0,0874	0,0922	0,0922	0,0884	0,0874	0,0874
16	17	-0,1554	-0,1537	-0,1553	-0,1553	-0,1555	-0,1555	-0,1548	-0,1554	-0,1554
17	18	0,8043	0,8096	0,8043	0,8043	0,8081	0,8081	0,8043	0,8043	0,8043
17	31	0,1556	0,1492	0,1556	0,1556	0,1567	0,1567	0,1549	0,1556	0,1556
17	113	0,0339	0,0277	0,0339	0,0339	0,0350	0,0350	0,0332	0,0339	0,0339
18	19	0,2044	0,2098	0,2044	0,2044	0,2082	0,2082	0,2045	0,2044	0,2044
19	20	-0,0860	-0,0929	-0,0860	-0,0860	-0,0858	-0,0858	-0,0866	-0,0860	-0,0860
19	34	-0,0246	-0,0091	-0,0245	-0,0245	-0,0183	-0,0183	-0,0236	-0,0245	-0,0245
20	21	-0,2657	-0,2724	-0,2657	-0,2657	-0,2655	-0,2655	-0,2662	-0,2657	-0,2657
21	22	-0,4054	-0,4120	-0,4054	-0,4054	-0,4053	-0,4053	-0,4059	-0,4054	-0,4054
22	23	-0,5051	-0,5114	-0,5051	-0,5051	-0,5049	-0,5049	-0,5055	-0,5051	-0,5051
23	24	0,3372	0,3114	0,3374	0,3374	0,3430	0,3430	0,3356	0,3372	0,3372
23	25	-1,7550	-1,7440	-1,7551	-1,7551	-1,7590	-1,7590	-1,7542	-1,7550	-1,7550
23	32	0,8443	0,8535	0,8442	0,8442	0,8423	0,8423	0,8449	0,8442	0,8442
24	70	0,0702	0,0575	0,0703	0,0702	0,0730	0,0730	0,0695	0,0702	0,0702
24	72	0,1380	0,1253	0,1381	0,1381	0,1408	0,1408	0,1373	0,1380	0,1380
25	27	1,3920	1,3931	1,3920	1,3920	1,3924	1,3924	1,3920	1,3920	1,3920
26	30	2,1972	2,2109	2,1974	2,1974	2,1919	2,1919	2,1994	2,1972	2,1972
27	28	0,3238	0,3256	0,3238	0,3238	0,3236	0,3236	0,3240	0,3238	0,3238
27	32	0,1436	0,1437	0,1436	0,1436	0,1439	0,1439	0,1437	0,1436	0,1436
27	115	0,2160	0,2160	0,2160	0,2160	0,2162	0,2162	0,2160	0,2160	0,2160
28	29	0,1541	0,1561	0,1541	0,1541	0,1538	0,1538	0,1543	0,1541	0,1541
29	31	-0,0857	-0,0837	-0,0857	-0,0857	-0,0860	-0,0860	-0,0855	-0,0857	-0,0857
30	38	0,7239	0,7586	0,7253	0,7252	0,6968	0,6968	0,7362	0,7239	0,7239
31	32	-0,2897	-0,2938	-0,2897	-0,2897	-0,2890	-0,2890	-0,2901	-0,2897	-0,2897
32	113	0,0258	0,0318	0,0258	0,0258	0,0248	0,0248	0,0264	0,0258	0,0258
32	114	0,0837	0,0836	0,0837	0,0837	0,0836	0,0836	0,0837	0,0837	0,0837
33	37	-0,1422	-0,1286	-0,1421	-0,1422	-0,1375	-0,1375	-0,1412	-0,1422	-0,1422
34	36	0,3045	0,3007	0,3046	0,3046	0,3000	0,3000	0,3049	0,3045	0,3045
34	37	-0,9107	-0,9453	-0,9102	-0,9102	-0,9520	-0,9520	-0,9068	-0,9107	-0,9107
34	43	0,0022	0,0571	0,0017	0,0018	0,0542	0,0542	-0,0009	0,0022	0,0022
35	36	0,0054	0,0092	0,0054	0,0054	0,0099	0,0099	0,0050	0,0054	0,0054
35	37	-0,3353	-0,3391	-0,3353	-0,3353	-0,3398	-0,3398	-0,3349	-0,3353	-0,3353
37	39	0,4969	0,5129	0,4963	0,4964	0,5229	0,5229	0,4930	0,4969	0,4969

37	40	0,3953	0,4112	0,3947	0,3948	0,4211	0,4211	0,3915	0,3953	0,3953
38	65	-1,5650	-1,5841	-1,5616	-1,5620	-1,6861	-1,6861	-1,5385	-1,5650	-1,5650
39	40	0,2271	0,2433	0,2266	0,2266	0,2531	0,2531	0,2233	0,2271	0,2271
40	41	0,1177	0,1338	0,1172	0,1172	0,1435	0,1435	0,1139	0,1177	0,1177
40	42	-0,1546	-0,1384	-0,1551	-0,1551	-0,1287	-0,1287	-0,1584	-0,1546	-0,1546
41	42	-0,2520	-0,2358	-0,2526	-0,2525	-0,2262	-0,2262	-0,2558	-0,2520	-0,2520
42	49	-0,6196	-0,5235	-0,6198	-0,6198	-0,5430	-0,5430	-0,6209	-0,6196	-0,6196
42	49	-0,6196	-0,5235	-0,6198	-0,6198	-0,5430	-0,5430	-0,6209	-0,6196	-0,6196
43	44	-0,1773	-0,1221	-0,1777	-0,1777	-0,1253	-0,1253	-0,1802	-0,1773	-0,1772
44	45	-0,3313	-0,2748	-0,3318	-0,3317	-0,2786	-0,2786	-0,3342	-0,3313	-0,3313
45	46	-0,3317	-0,3196	-0,3320	-0,3319	-0,3167	-0,3167	-0,3333	-0,3317	-0,3317
45	49	-0,5247	-0,4788	-0,5249	-0,5249	-0,4862	-0,4862	-0,5259	-0,5247	-0,5247
46	47	-0,2402	-0,2547	-0,2404	-0,2404	-0,2452	-0,2452	-0,2417	-0,2402	-0,2402
46	48	-0,1782	-0,1499	-0,1782	-0,1782	-0,1571	-0,1571	-0,1782	-0,1782	-0,1782
47	49	-0,3538	-0,2141	-0,3533	-0,3534	-0,2615	-0,2615	-0,3505	-0,3538	-0,3538
47	69	-0,2262	-0,3803	-0,2269	-0,2268	-0,3235	-0,3235	-0,2310	-0,2262	-0,2262
48	49	-0,3751	-0,3443	-0,3751	-0,3751	-0,3524	-0,3524	-0,3750	-0,3751	-0,3751
49	50	0,4496	0,3597	0,4498	0,4498	0,3690	0,3690	0,4513	0,4496	0,4496
49	51	0,5572	0,4474	0,5575	0,5575	0,4588	0,4588	0,5594	0,5572	0,5572
49	54	0,2956	0,2007	0,2959	0,2958	0,2106	0,2106	0,2975	0,2956	0,2956
49	54	0,2936	0,1993	0,2938	0,2938	0,2091	0,2091	0,2954	0,2936	0,2936
49	66	-1,1666	-1,5422	-1,1630	-1,1634	0,0000	-1,9375	-1,1400	-1,1666	-1,1666
49	66	-1,1666	-1,5422	-1,1630	-1,1634	-1,9375	0,0000	-1,1400	-1,1666	-1,1666
49	69	-0,1257	-0,2848	-0,1264	-0,1263	-0,2269	-0,2269	-0,1304	-0,1257	-0,1257
50	57	0,2797	0,1899	0,2799	0,2799	0,1991	0,1991	0,2814	0,2797	0,2797
51	52	0,2570	0,2209	0,2571	0,2571	0,2248	0,2248	0,2577	0,2570	0,2570
51	58	0,1303	0,0566	0,1305	0,1305	0,0641	0,0641	0,1318	0,1303	0,1303
52	53	0,0771	0,0411	0,0772	0,0772	0,0449	0,0449	0,0778	0,0771	0,0771
53	54	-0,1527	-0,1887	-0,1526	-0,1526	-0,1849	-0,1849	-0,1520	-0,1527	-0,1527
54	55	0,0701	0,0631	0,0703	0,0702	0,0572	0,0572	0,0715	0,0701	0,0701
54	56	0,1343	0,1330	0,1344	0,1344	0,1274	0,1274	0,1354	0,1343	0,1343
54	59	-0,2764	-0,3149	-0,2754	-0,2755	-0,3450	-0,3450	-0,2692	-0,2764	-0,2764
55	56	-0,2431	-0,2114	-0,2439	-0,2438	-0,1873	-0,1873	-0,2489	-0,2431	-0,2431
55	59	-0,3166	-0,3553	-0,3157	-0,3158	-0,3853	-0,3853	-0,3094	-0,3167	-0,3167
56	57	-0,1598	-0,0700	-0,1600	-0,1600	-0,0792	-0,0792	-0,1616	-0,1598	-0,1598
56	58	-0,0104	0,0632	-0,0106	-0,0106	0,0558	0,0558	-0,0119	-0,0104	-0,0104
56	59	-0,2576	-0,2928	-0,2567	-0,2568	-0,3200	-0,3200	-0,2511	-0,2576	-0,2576
56	59	-0,2705	-0,3075	-0,2696	-0,2697	-0,3361	-0,3361	-0,2637	-0,2706	-0,2706
59	60	-0,3273	-0,3345	-0,3266	-0,3266	-0,3859	-0,3859	-0,3215	-0,3274	-0,3274
59	61	-0,4095	-0,4176	-0,4086	-0,4087	-0,4653	-0,4653	-0,4032	-0,4095	-0,4095
60	61	-1,0338	-1,0477	-1,0328	-1,0329	-1,0260	-1,0260	-1,0269	-1,0338	-1,0338
60	62	-0,0735	-0,0666	-0,0736	-0,0736	-0,1398	-0,1398	-0,0745	-0,0735	-0,0735
61	62	0,2615	0,2767	0,2610	0,2611	0,1599	0,1599	0,2576	0,2615	0,2615
62	66	-0,3563	-0,3453	-0,3567	-0,3566	-0,4404	-0,4404	-0,3588	-0,3563	-0,3563
62	67	-0,2255	-0,2144	-0,2258	-0,2258	-0,3094	-0,3094	-0,2279	-0,2255	-0,2255
63	64	-1,0958	-1,1336	-1,0926	-1,0929	-1,2144	-1,2144	-1,0718	-1,0959	-1,0959

64	65	-1,1998	-1,2743	-1,1942	-1,1948	-1,2652	-1,2652	-1,1583	-1,1999	-1,1999
65	68	1,9260	1,6659	1,9439	1,9420	2,3229	2,3229	2,0601	1,9258	1,9257
66	67	0,5054	0,4943	0,5057	0,5057	0,5893	0,5893	0,5079	0,5054	0,5054
68	81	-0,0978	-0,1783	-0,0488	-0,0539	0,0258	0,0258	0,2675	-0,0984	-0,0986
68	116	1,8399	1,8398	1,8399	1,8399	1,8399	1,8399	1,8398	1,8399	1,8399
69	70	0,8708	0,8853	0,8747	0,8743	0,8657	0,8657	0,8899	0,8707	0,8707
69	75	0,9585	0,9670	0,9652	0,9645	0,9535	0,9535	0,9898	0,9584	0,9584
69	77	0,4821	0,4903	0,5021	0,5000	0,4710	0,4710	0,5743	0,4818	0,4817
70	71	0,0415	0,0540	0,0414	0,0414	0,0387	0,0387	0,0421	0,0415	0,0415
70	74	0,1951	0,1904	0,1969	0,1967	0,1953	0,1953	0,2031	0,1951	0,1951
70	75	0,0450	0,0393	0,0473	0,0470	0,0453	0,0453	0,0549	0,0450	0,0450
71	72	-0,0183	-0,0058	-0,0184	-0,0184	-0,0211	-0,0211	-0,0177	-0,0183	-0,0183
71	73	0,0600	0,0600	0,0600	0,0600	0,0600	0,0600	0,0600	0,0600	0,0600
74	75	-0,4794	-0,4840	-0,4775	-0,4777	-0,4792	-0,4792	-0,4712	-0,4794	-0,4794
75	77	-0,3414	-0,3424	-0,3354	-0,3360	-0,3439	-0,3439	-0,3139	-0,3415	-0,3415
75	118	0,3959	0,3950	0,4007	0,4002	0,3939	0,3939	0,4178	0,3958	0,3958
76	77	-0,6140	-0,6148	-0,6092	-0,6097	-0,6161	-0,6161	-0,5921	-0,6141	-0,6141
76	118	-0,0659	-0,0651	-0,0707	-0,0702	-0,0639	-0,0639	-0,0878	-0,0658	-0,0658
77	78	0,3121	0,3231	0,3300	0,3281	0,2942	0,2942	0,4991	0,3118	0,3118
77	80	-1,2599	-1,2354	-1,2200	-1,2242	-1,2995	-1,2995	-0,8450	-1,2604	-1,2606
77	80	-0,5820	-0,5706	-0,5635	-0,5655	-0,6003	-0,6003	-0,3903	-0,5822	-0,5823
77	82	0,1907	0,1918	0,2268	0,2230	0,1882	0,1882	0,1459	0,1902	0,1901
78	79	-0,3979	-0,3869	-0,3800	-0,3819	-0,4158	-0,4158	-0,2109	-0,3981	-0,3982
79	80	-0,7850	-0,7739	-0,7669	-0,7688	-0,8030	-0,8030	-0,5969	-0,7853	-0,7853
80	96	0,4090	0,4043	0,4303	0,4281	0,4162	0,4162	0,6483	0,4087	0,4087
80	97	0,4822	0,4775	0,5035	0,5013	0,4894	0,4894	0,7216	0,4819	0,4818
80	98	0,4761	0,4728	0,5385	0,5320	0,4812	0,4812	0,9135	0,4754	0,4751
80	99	0,3827	0,3794	0,4449	0,4385	0,3877	0,3877	0,8196	0,3819	0,3817
82	83	-0,2895	-0,2930	-0,3047	-0,3031	-0,2844	-0,2844	-1,6074	-0,2893	-0,2892
82	96	-0,0553	-0,0507	-0,0036	-0,0090	-0,0629	-0,0629	1,2183	-0,0560	-0,0562
83	84	-0,1892	-0,1907	-0,1957	-0,1950	-0,1871	-0,1871	-0,7567	-0,1891	-0,1891
83	85	-0,2983	-0,3003	-0,3069	-0,3060	-0,2955	-0,2955	-1,0503	-0,2982	-0,2982
84	85	-0,2992	-0,3007	-0,3057	-0,3050	-0,2970	-0,2970	-0,8667	-0,2991	-0,2991
85	86	0,1699	0,1699	0,1699	0,1699	0,1699	0,1699	0,1703	0,1699	0,1699
85	88	-0,4046	-0,4064	-0,4122	-0,4114	-0,4021	-0,4021	-1,0643	-0,4045	-0,4045
85	89	-0,6026	-0,6044	-0,6102	-0,6094	-0,6002	-0,6002	-1,2632	-0,6025	-0,6025
86	87	-0,0400	-0,0400	-0,0400	-0,0400	-0,0400	-0,0400	-0,0399	-0,0400	-0,0400
88	89	-0,8846	-0,8863	-0,8921	-0,8913	-0,8821	-0,8821	-1,5445	-0,8845	-0,8845
89	90	0,7426	0,7426	0,7455	0,7452	0,7426	0,7426	1,8226	0,7426	0,7426
89	90	1,4003	1,4003	1,4058	1,4053	1,4003	1,4003	3,4367	1,4002	1,4002
89	92	2,5657	2,5703	2,6555	2,6461	2,5588	2,5588	0,0000	2,5646	2,5643
89	92	0,8195	0,8210	0,8482	0,8452	0,8173	0,8173	4,3554	0,8192	0,8191
90	91	0,0127	0,0138	0,0316	0,0296	0,0111	0,0111	1,7014	0,0124	0,0124
91	92	-0,0873	-0,0862	-0,0684	-0,0703	-0,0889	-0,0889	1,6015	-0,0875	-0,0876
92	93	0,2585	0,2618	0,2945	0,2908	0,2536	0,2536	-0,6079	0,2581	0,2579
92	94	0,2029	0,2063	0,2390	0,2352	0,1980	0,1980	-0,6634	0,2025	0,2024
92	100	0,0946	0,0967	0,1466	0,1412	0,0913	0,0913	-0,3653	0,0939	0,0937

92	102	0,2296	0,2318	0,2818	0,2763	0,2264	0,2264	-0,2320	0,2290	0,2288
93	94	0,1386	0,1419	0,1746	0,1708	0,1336	0,1336	-0,7277	0,1381	0,1380
94	95	0,1776	0,1798	0,1332	0,1379	0,1744	0,1744	-0,6458	0,1781	0,1783
94	96	-0,0639	-0,0614	-0,1139	-0,1087	-0,0674	-0,0674	-0,9934	-0,0632	-0,0631
94	100	-0,0719	-0,0699	0,0946	0,0773	-0,0750	-0,0750	-0,0509	-0,0739	-0,0745
95	96	-0,2424	-0,2402	-0,2867	-0,2821	-0,2455	-0,2455	-1,0657	-0,2418	-0,2416
96	97	-0,3323	-0,3276	-0,3536	-0,3514	-0,3394	-0,3394	-0,5717	-0,3320	-0,3319
98	100	0,1363	0,1330	0,1986	0,1921	0,1413	0,1413	0,5738	0,1355	0,1353
99	100	-0,0371	-0,0404	0,0252	0,0187	-0,0321	-0,0321	0,4001	-0,0379	-0,0381
100	101	0,0401	0,0380	-0,0121	-0,0066	0,0434	0,0434	0,5012	0,0408	0,0410
100	103	1,1239	1,1238	1,4327	1,3517	1,1241	1,1241	1,1115	1,5082	1,5049
100	104	0,5343	0,5342	0,5835	0,6011	0,5343	0,5343	0,5290	0,0000	0,7219
100	106	0,5748	0,5747	0,6124	0,6346	0,5748	0,5748	0,5694	0,7201	0,0000
101	102	-0,1797	-0,1819	-0,2319	-0,2264	-0,1764	-0,1764	0,2817	-0,1791	-0,1789
103	104	0,3155	0,3155	0,2766	0,3261	0,3156	0,3156	0,3129	0,5207	0,4309
103	105	0,4170	0,4170	0,3815	0,4453	0,4170	0,4170	0,4128	0,5404	0,5999
103	110	0,5622	0,5622	0,5455	0,7513	0,5623	0,5623	0,5578	0,6180	0,6451
104	105	0,4704	0,4703	0,4808	0,5479	0,4704	0,4704	0,4632	0,1413	0,7734
105	106	0,0887	0,0887	0,0555	0,0362	0,0886	0,0886	0,0909	-0,0382	0,5880
105	107	0,2606	0,2606	0,2553	0,2523	0,2606	0,2606	0,2590	0,2412	0,3345
105	108	0,2415	0,2415	0,2571	0,4107	0,2415	0,2415	0,2406	0,1848	0,1576
106	107	0,2341	0,2341	0,2387	0,2415	0,2341	0,2341	0,2319	0,2526	0,1588
108	109	0,2216	0,2216	0,2373	0,3909	0,2217	0,2217	0,2210	0,1650	0,1378
109	110	0,1418	0,1418	0,1575	0,3111	0,1418	0,1418	0,1414	0,0852	0,0580
110	111	-0,3601	-0,3601	-0,3602	-0,0002	-0,3601	-0,3601	-0,3603	-0,3601	-0,3602
110	112	0,6796	0,6796	0,6795	0,6795	0,6796	0,6796	0,6791	0,6795	0,6795
114	115	0,0038	0,0038	0,0038	0,0038	0,0037	0,0037	0,0038	0,0038	0,0038
5	8	-3,3905	-3,3970	-3,3907	-3,3907	-3,3925	-3,3925	-3,3917	-3,3905	-3,3905
17	30	-2,2974	-2,2974	-2,2972	-2,2972	-2,3097	-2,3097	-2,2952	-2,2974	-2,2974
25	26	-0,9460	-0,9352	-0,9460	-0,9460	-0,9505	-0,9505	-0,9448	-0,9460	-0,9460
37	38	-2,2965	-2,3541	-2,2948	-2,2950	-2,3895	-2,3895	-2,2837	-2,2966	-2,2966
59	63	-1,0961	-1,1341	-1,0929	-1,0932	-1,2146	-1,2146	-1,0722	-1,0962	-1,0962
61	64	-0,1047	-0,1419	-0,1024	-0,1026	-0,0512	-0,0512	-0,0875	-0,1047	-0,1048
66	65	0,7785	0,6101	0,7873	0,7864	1,3628	1,3628	0,8434	0,7784	0,7784
69	68	-0,1851	-0,0065	-0,1541	-0,1573	-0,4579	-0,4579	0,0450	-0,1855	-0,1857
80	81	0,0971	0,1773	0,0480	0,0532	-0,0262	-0,0262	-0,2688	0,0977	0,0979

Observamos que antes de simular alguna contingencia, en el estado inicial ya se producen sobrecargas. Esto ocurre para las líneas 23-25, 25-27, 77-80, 89-90 del segundo circuito y 89-92 del primer circuito. Inicialmente se encuentran al 145%, 115%, 104%, 115% y 212% respectivamente. Esta situación de sobrecarga se mantiene en los resultados para todas las contingencias, a excepción de la línea 77-80, que reduce su carga al 70% cuando se desconecta la línea 89-92 del primer circuito. Al no tener información exacta del DCLF, no sabemos si inicialmente estas sobrecargas son reales o no.

Podemos destacar las sobrecargas en los dos circuitos de la línea 49-66. Estas líneas superan sus límites de potencia cuando se desconecta el generador del nudo 49. También se sobrecarga una de ellas cuando la otra se desconecta. Al ser un circuito doble y al soportar en el estado inicial una carga tan cercana al límite (96,6%), cuando se desconecta el generador del bus aumenta su carga hasta el 127% pero cuando se produce la contingencia en una de las líneas, la otra alcanza el 160% de su carga.

En este caso, hemos detectado estas sobrecargas. Sin embargo, como hemos visto, el método empleando factores de distribución ha llegado a tener en algunos casos errores medios bastante significativos. Además, al ser el límite de sobrecarga tan pequeño (1,2081 en pu), sabemos que los errores aumentan, alcanzando en algunos casos más del 100%. Esto nos indica que existen algunos casos en los que debemos tener en cuenta que, aunque con factores de distribución no hayamos detectado sobrecarga, para valores cercanos al límite de la línea existe una probabilidad alta de que realmente si se produjera.

5.4 Red IEEE-300

A continuación, vamos a estudiar los resultados que se obtienen de realizar el análisis N-1 empleando factores de distribución a la red *IEEE-300*. Esta red está compuesta por 300 nudos. Como vemos en la Figura 5-6, su complejidad es aún mayor que la red *IEEE-118*. En este caso, vamos a trabajar con hasta 13 niveles de tensión.

Esta red está formada por 69 generadores, 306 líneas, 195 cargas y 105 transformadores.

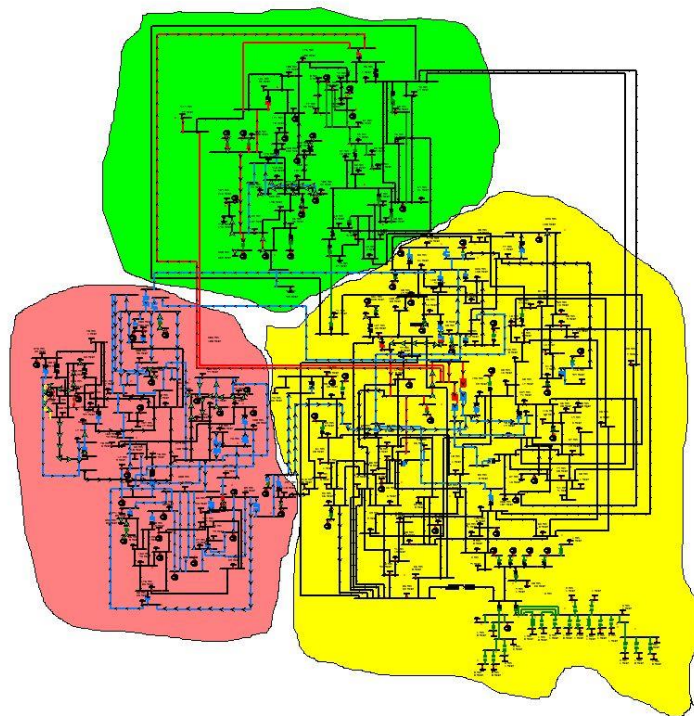


Figura 5-6. Esquema de la red IEEE-300.

En este caso, se comprueba que el flujo de cargas converge en 4 iteraciones. Sin embargo, los tiempos de ejecución aumentan considerablemente a los que obtuvimos para la red de 14 nudos o la de 39 nudos. Gracias a los datos de los flujos de carga iniciales vamos a comprobar que error cometemos utilizando el método de flujos en continua o *DCLF*.

Tabla 5-17 Flujo por las ramas utilizando Newton Raphson y DCLF para red de 300 nudos.

Origen	Destino	P_{ij} (pu)	P_{ji} (pu)	P_{ij} DCLF (pu)	Error (%)	Q_{ij} (pu)	Q_{ji} (pu)
1	5	4,0472	-4,0308	4,0016	0,925	0,995	-0,896
2	6	1,5366	-1,5342	1,6082	4,742	0,356	-0,335
2	8	3,7524	-3,6733	3,6394	1,980	0,098	0,201
3	7	2,6209	-2,6209	2,8521	8,822	1,173	-1,148
3	18	1,3967	-1,3808	1,3709	1,285	0,039	-0,037
3	129	0,8893	-0,8864	1,3801	55,433	1,441	-1,420
4	16	7,0607	-6,9660	6,4287	8,336	-0,943	0,651
5	9	1,2350	-1,2256	1,1759	4,427	0,294	-0,267

7	12	1,8052	-1,8013	1,7337	3,858	-0,756	0,721
7	110	0,4157	-0,4143	0,8175	96,988	1,071	-1,075
8	11	0,0181	-0,0178	-0,0081	145,172	0,130	-0,162
8	14	3,0253	-2,9081	3,0102	1,467	-0,371	0,668
9	11	0,2656	-0,2651	0,2144	19,197	-0,163	0,152
11	13	1,5862	-1,5662	1,5070	4,391	-0,090	0,157
12	20	4,1980	-4,1604	4,1211	1,390	0,957	-0,789
13	19	0,9862	-0,9786	0,9254	5,805	0,516	-0,489
14	15	1,3081	-1,2634	1,4034	9,155	-1,257	1,292
15	31	0,3266	-0,3201	0,3059	5,395	-0,083	-0,019
15	74	0,1977	-0,1936	0,1775	9,266	-0,087	0,060
15	75	0,1754	-0,1726	0,1560	10,359	-0,050	0,010
16	36	3,7238	-3,6962	3,5283	4,898	-1,555	0,486
18	20	-0,4889	0,4898	-0,4787	2,182	0,391	-0,418
18	72	1,8697	-1,8213	1,8348	0,580	-0,354	0,505
19	21	-0,1950	0,2007	-0,1735	12,293	-0,555	0,553
19	26	0,2292	-0,2248	0,2333	2,760	-0,129	0,048
20	23	-2,2050	2,2269	-2,3384	5,528	-0,697	0,609
21	22	-1,0107	1,0644	-0,9866	4,913	0,014	0,049
22	24	1,2810	-1,2524	1,2273	3,111	0,117	-0,078
23	231	1,1678	-1,1580	1,1645	0,140	-0,282	0,240
24	25	0,8024	-0,7802	0,7747	2,091	-0,041	0,050
25	26	0,4754	-0,4652	0,4646	1,215	0,002	-0,037
25	232	0,0248	-0,0240	0,0247	1,216	-0,138	0,126
27	28	-1,5815	1,5815	-1,4970	5,341	-0,193	0,345
27	32	1,0366	-1,0340	0,9722	6,095	0,140	-0,141
27	34	0,6749	-0,6722	0,4970	26,218	-0,044	0,036
27	35	-0,6800	0,6831	-0,5230	23,265	-0,004	-0,004
28	36	-1,5815	1,5838	-1,4977	5,368	-0,265	0,238
29	60	0,4960	-0,4929	0,4751	3,917	0,003	0,004
29	63	1,1973	-1,1874	1,1916	0,065	0,363	-0,342
29	64	-0,5271	0,5301	-0,5499	4,042	-0,089	0,095
30	73	-1,1662	1,1721	-1,1161	4,538	-0,350	0,346
31	32	0,0059	-0,0059	0,2651	4381,373	-0,008	-0,001
31	34	0,1041	-0,1038	0,2376	128,537	-0,063	0,056
31	35	-1,1167	1,1288	-0,6025	46,334	0,068	-0,046
31	43	-1,9384	2,0005	-0,4782	75,722	0,176	0,069
31	74	-0,1078	0,1089	-0,1253	15,671	-0,020	-0,012
31	75	-0,1336	0,1344	-0,1515	13,045	-0,016	0,002
32	35	-1,1122	1,1218	-0,9231	17,364	0,009	0,015
32	37	0,6021	-0,5910	0,6093	2,133	-0,004	-0,006
33	36	5,0000	-4,9858	4,9931	0,004	0,849	-1,141
34	42	0,3161	-0,3134	0,2739	12,980	0,069	-0,076
35	36	-2,8578	2,8578	-2,8899	1,121	-0,429	0,658
35	43	-0,5843	0,6064	-0,0892	85,015	0,120	-0,076
35	44	-0,3515	0,3560	0,0688	119,453	0,150	-0,176

36	40	4,2403	-4,2072	4,0909	3,144	-0,179	-0,457
37	38	-0,1324	0,1330	-0,1021	23,027	-0,088	0,054
37	42	0,0055	-0,0055	-0,0309	665,563	-0,023	-0,009
37	46	0,3279	-0,3265	0,3509	7,260	0,000	-0,012
38	41	1,0346	-1,0060	0,9801	3,939	0,061	-0,010
38	47	-0,0540	0,0541	-0,0447	17,320	0,042	-0,079
39	52	-1,7460	1,7668	-1,7148	2,364	0,081	-0,286
39	62	1,7228	-1,6966	1,6610	2,846	0,054	-0,316
40	68	1,5367	-1,5255	1,5078	1,522	-0,514	-0,129
41	61	0,0802	-0,0798	0,0937	17,174	-0,060	-0,008
41	92	0,3459	-0,3403	0,3061	10,772	-0,060	0,063
42	87	-0,0911	0,0916	-0,1679	83,802	-0,093	0,087
43	44	0,8780	-0,8562	0,2464	71,581	-0,026	0,045
44	45	0,5502	-0,5393	0,3640	33,179	0,056	-0,074
45	48	-0,0707	0,0719	-0,2470	246,450	-0,216	0,183
46	47	-0,3635	0,3669	-0,3396	7,004	-0,017	-0,008
47	48	-0,5210	0,5307	-0,4855	7,667	0,069	-0,088
48	49	-0,3726	0,3815	-0,5048	33,881	0,002	-0,065
49	50	-0,0551	0,0699	-0,1526	144,024	0,565	-0,576
49	55	0,3436	-0,3247	0,3133	6,229	0,057	-0,063
50	51	-0,2099	0,2133	-0,2937	38,787	0,563	-0,558
51	53	-2,3933	2,4057	-2,4742	3,115	-0,503	0,570
52	54	-1,7668	1,7956	-1,7283	2,967	0,249	-0,547
54	56	1,9612	-1,8969	1,8492	4,140	0,453	-0,227
54	123	-0,4326	0,4328	-0,3444	20,398	0,079	-0,091
55	236	1,5216	-1,4530	1,4537	2,256	-0,002	0,424
57	66	-0,1007	0,1017	-0,0852	15,792	-0,094	0,075
57	190	-0,3354	0,3419	-0,3393	0,183	-0,087	0,090
58	59	-0,8437	0,8689	-0,8395	1,960	0,014	0,007
58	237	0,2837	-0,2810	0,2806	0,602	-0,214	0,205
59	60	-0,2946	0,2989	-0,2771	6,628	0,129	-0,179
59	61	-0,5743	0,5880	-0,5604	3,566	0,215	-0,220
60	64	-0,5165	0,5217	-0,5110	1,570	-0,045	0,059
60	238	0,1406	-0,1400	0,1400	0,200	0,029	-0,025
61	63	0,1557	-0,1544	0,1291	16,723	0,175	-0,199
61	66	-0,4001	0,4032	-0,4330	7,799	0,051	-0,059
62	73	-1,3198	1,3277	-1,2349	6,718	-0,490	0,493
62	240	0,5126	-0,5050	0,5005	1,642	-0,142	-0,174
63	64	-0,7381	0,7481	-0,7589	2,117	-0,178	0,201
64	65	-2,5534	2,5605	-2,5575	0,021	-0,579	0,615
64	67	-0,1800	0,1805	-0,1852	2,728	-0,029	-0,005
64	239	-0,1098	0,1110	-0,1114	0,862	-0,039	0,014
64	241	0,3035	-0,2960	0,2957	1,338	0,006	-0,006
65	66	0,8195	-0,8153	0,8227	0,654	0,138	-0,133
65	69	-3,3800	3,3800	-3,3800	0,000	-0,760	1,201
66	190	-0,1696	0,1726	-0,1742	1,837	-0,026	-0,013
67	190	-0,4605	0,4653	-0,4637	0,162	-0,056	0,022

68	173	-0,9956	0,9992	-0,8736	12,412	-0,636	0,096
68	174	0,0213	-0,0213	0,0554	159,949	-0,348	-0,219
70	71	-0,8973	0,9040	-0,8614	4,359	0,025	-0,096
71	72	-1,1646	1,1817	-1,1373	3,056	0,125	-0,172
71	234	-0,1486	0,1490	-0,1467	1,391	0,179	-0,265
74	76	-0,3573	0,3630	-0,3918	8,781	-0,045	0,044
75	77	-0,6219	0,6336	-0,6572	4,690	-0,019	0,057
76	78	0,0609	-0,0559	0,0543	7,061	0,210	-0,229
76	79	0,9521	-0,9331	0,9278	1,566	0,202	-0,177
77	84	0,7543	-0,7443	0,7434	0,794	0,100	-0,042
77	86	1,3541	-1,3255	1,3405	0,050	0,162	-0,020
78	79	0,0925	-0,0864	0,1351	51,034	-0,136	0,102
79	82	0,4069	-0,4033	0,4266	5,321	0,066	-0,064
79	83	0,3764	-0,3711	0,3946	5,594	0,038	-0,038
79	84	-0,1628	0,1640	-0,1601	2,036	-0,030	0,018
80	82	-0,0646	0,0648	-0,0659	1,802	-0,070	0,063
80	83	0,0776	-0,0774	0,0783	1,112	-0,033	0,018
81	87	-0,4716	0,4839	-0,4360	8,738	0,048	-0,034
81	88	-0,0864	0,0864	-0,1545	78,906	-0,127	0,125
81	89	0,2359	-0,2333	0,2339	0,299	-0,001	-0,021
81	90	0,3844	-0,3769	0,3788	0,491	-0,014	0,019
82	83	0,3385	-0,3367	0,3604	6,748	-0,001	0,001
83	85	0,4163	-0,4072	0,4665	13,303	-0,207	0,193
84	86	0,2603	-0,2591	0,2625	1,084	0,026	-0,030
85	88	0,2971	-0,2892	0,3543	20,869	-0,144	0,114
85	233	0,0241	-0,0240	0,0243	1,104	-0,054	0,039
86	87	0,6260	-0,6214	0,6505	4,296	0,075	-0,052
86	90	0,4626	-0,4304	0,4550	1,918	-0,036	0,071
88	235	0,2518	-0,2470	0,2475	0,772	-0,024	0,012
89	90	-0,0682	0,0686	-0,0917	34,069	0,027	-0,046
89	92	-0,0775	0,0783	-0,0440	43,568	0,032	-0,059
89	93	0,0720	-0,0713	0,0614	14,283	-0,035	0,004
90	91	0,1086	-0,1067	0,1104	2,564	-0,058	0,016
91	93	-0,0893	0,0895	-0,0857	4,143	-0,017	0,011
94	101	1,7122	-1,6973	1,9205	12,658	0,749	-0,670
95	99	-2,7857	2,8020	-2,6286	5,917	0,316	0,541
96	97	-9,0959	9,1072	-9,1409	0,432	3,137	-2,950
97	98	-9,0762	9,0762	-9,1165	0,444	-3,518	6,661
97	100	0,4810	-0,4803	0,5036	4,772	0,212	-0,114
97	245	-0,6530	0,6530	-0,6701	2,626	-0,305	0,697
98	99	2,6377	-2,6377	2,4132	8,512	1,570	-1,277
98	100	6,5819	-6,5819	6,7672	2,815	5,033	-1,377
98	243	1,0042	-1,0031	1,0031	0,053	0,403	-0,378
99	244	-1,0000	1,0000	-1,0000	0,000	0,368	-0,342
99	245	0,6530	-0,6530	0,6701	2,626	0,472	-0,713
101	102	0,2260	-0,2183	0,3237	45,727	-0,171	0,169

101	104	0,5091	-0,4738	0,5905	20,143	-0,208	0,296
102	103	-1,4405	1,5314	-1,4726	0,899	0,205	-0,038
102	104	0,8788	-0,8274	0,9955	16,691	-0,440	0,463
104	105	-3,8467	3,8568	-3,5761	7,157	0,415	-0,085
105	106	1,6616	-1,6375	2,1308	29,175	-1,048	0,983
105	108	0,1459	-0,1436	0,2737	89,029	-0,476	0,325
105	111	-0,7644	0,7780	-0,8302	7,662	-0,303	0,116
105	136	-3,1247	3,1878	-3,4272	8,582	1,058	-0,711
105	137	-2,8274	2,9067	-3,0393	6,006	0,927	-0,664
105	148	0,4733	-0,4676	0,6274	33,363	-0,359	0,242
106	107	-0,7389	0,7424	-0,7166	3,247	-0,190	0,133
106	113	-0,7002	0,7070	-0,2979	57,667	-1,007	0,848
106	147	-0,7314	0,7349	-0,7081	3,413	-0,192	0,134
107	109	-2,5815	2,6350	-2,8398	8,879	0,173	0,231
107	112	1,8391	-1,8299	2,1064	14,820	-0,297	0,335
108	109	-2,4763	2,5242	-2,7239	8,945	0,099	0,254
108	112	2,6199	-2,6047	2,9751	13,885	-0,432	0,537
109	111	2,0487	-2,0411	2,0989	2,642	0,802	-0,751
109	130	1,5143	-1,5096	1,5204	0,560	0,726	-0,707
109	146	2,8948	-2,8257	3,0970	8,277	0,698	-0,127
109	147	2,6037	-2,5515	2,8062	8,868	0,232	0,168
112	116	-1,1162	1,1488	0,1982	117,501	-4,334	4,259
112	147	-1,8076	1,8166	-2,0812	14,852	0,330	-0,293
112	148	-0,2903	0,2930	-0,6998	139,956	1,070	-1,075
112	150	7,6488	-7,6360	7,6360	0,084	2,056	-1,411
113	114	-0,0875	0,0876	0,2426	377,140	-0,164	-0,020
113	163	-0,6195	0,6221	-0,5884	5,218	-0,682	0,438
114	115	-1,7796	1,8079	-1,4933	16,752	-0,379	0,165
115	116	1,3676	-1,3462	1,0961	19,218	-0,370	-0,067
115	131	-3,7276	3,8018	-3,3015	12,304	0,259	-0,785
116	119	3,0871	-3,0740	2,7535	10,616	-0,265	0,057
116	160	2,6814	-2,6768	2,6553	0,888	-1,656	1,664
116	165	-4,2195	4,2319	-4,2799	1,282	-1,305	1,434
116	167	-1,0467	1,0488	-1,0384	0,896	-1,865	1,856
117	160	-8,4384	8,4646	-8,4478	0,044	1,080	0,243
117	167	-9,0789	9,1091	-9,0695	0,269	1,068	0,458
118	151	0,2126	-0,2095	0,1580	25,130	-0,149	0,078
119	120	-0,8017	0,8092	-0,9329	15,828	-0,241	0,156
119	121	-0,2083	0,2099	-0,3984	90,547	-0,098	-0,611
119	124	-0,2071	0,2098	-0,2766	32,678	-0,144	-0,381
119	125	-0,5119	0,5224	-0,5530	6,941	-0,191	-0,242
119	126	-0,6489	0,6685	-0,6878	4,417	-0,174	-0,276
119	161	1,5749	-1,5716	1,5293	2,791	-0,551	0,444
120	125	-0,4084	0,4131	-0,3954	3,740	-0,075	-0,273
121	122	-2,4683	2,5045	-2,5990	4,529	-0,724	0,246
122	124	1,2046	-1,1925	1,2944	7,995	0,523	-0,525
122	128	-0,2441	0,2455	-0,2164	11,615	-0,328	0,185

124	125	-1,3726	1,3910	-1,2660	8,384	-0,608	0,643
124	128	-0,7693	0,7845	-0,7924	1,992	-0,454	0,315
125	126	-1,4865	1,5015	-1,4397	3,634	0,222	-0,201
127	157	1,0029	-0,9428	0,8988	7,608	0,488	-0,387
127	158	0,5288	-0,4933	0,4483	12,284	0,059	-0,036
131	132	-0,2518	0,2536	0,1465	157,963	0,212	-0,351
132	140	1,0173	-1,0102	1,3990	38,009	-0,664	0,500
133	135	-0,3423	0,3658	-0,2423	31,560	0,071	-0,068
133	162	-0,4648	0,4853	-0,4670	1,689	0,123	-0,088
134	140	-0,6550	0,6602	-0,9849	49,772	-0,426	0,046
136	138	-5,7529	5,7876	-5,9806	3,645	1,684	-1,316
137	138	-2,0658	2,0833	-2,3318	12,399	0,843	-0,829
137	139	-0,8409	0,8466	-0,7640	9,454	-0,273	0,073
141	143	4,9518	-4,8914	4,3751	11,104	0,205	0,386
141	144	-5,8018	5,8640	-5,4736	6,159	-0,343	-0,452
142	143	-3,0522	3,1014	-1,9668	36,075	-0,295	-2,790
144	145	-5,8640	5,8710	-5,7004	2,848	0,504	-0,077
146	148	-0,1733	0,1746	0,0879	150,508	-0,823	0,810
151	152	0,2709	-0,2660	0,1882	29,901	0,034	-0,061
151	153	-0,3265	0,3325	-0,3071	6,781	-0,101	0,091
152	153	-0,5951	0,6248	-0,4774	21,733	-0,059	0,130
152	154	-0,3484	0,3592	-0,3150	10,956	0,121	-0,117
152	155	-0,5961	0,6689	-0,6378	0,839	0,154	-0,022
154	155	-0,5754	0,6071	-0,6156	4,127	-0,036	0,114
154	158	0,1411	-0,1395	0,0782	44,239	-0,048	0,004
155	156	0,9541	-0,9313	0,9664	2,517	0,277	-0,252
156	157	1,4913	-1,4371	1,5204	3,841	0,482	-0,322
157	158	0,2541	-0,2480	0,2077	17,293	-0,221	0,217
157	159	-2,1483	2,1843	-2,0768	4,128	-0,804	0,898
160	166	-6,5218	6,5386	-6,5366	0,098	-1,906	2,126
163	164	-1,9901	2,0000	-1,9878	0,364	-0,604	0,523
165	167	7,1701	-7,1368	7,1042	0,688	1,511	-1,231
166	167	4,8634	-4,8471	4,8483	0,144	1,594	-1,522
168	187	0,2094	-0,2079	0,2163	3,672	-0,021	0,025
168	188	-0,1020	0,1025	-0,1043	1,942	0,034	-0,033
169	208	-0,2062	0,2062	-0,2633	27,729	0,154	-0,150
169	210	6,3365	-6,3216	5,5230	12,736	-2,157	-4,676
169	219	-0,8201	0,8201	-0,3163	61,424	1,348	-1,286
170	171	8,3200	-8,0962	8,2817	0,897	3,466	0,115
170	204	6,5200	-6,4731	6,5583	0,950	2,925	-0,064
171	204	0,0962	-0,0946	0,2817	195,364	-0,836	0,843
172	184	0,2942	-0,2896	0,3021	3,502	-0,113	0,120
172	187	-0,0448	0,0449	-0,0563	25,451	-0,008	0,008
173	198	0,1341	-0,1339	0,3060	128,386	-0,534	-0,017
173	242	-1,1333	1,1370	-1,1458	0,934	0,432	-0,767
174	198	-1,0517	1,0559	-0,7659	27,320	-0,858	0,350

175	176	-0,6416	0,6489	-0,5857	9,225	-0,285	0,302
175	189	-0,1427	0,1435	-0,1887	31,920	-0,063	0,056
176	177	-0,8990	0,9080	-0,9228	2,134	-0,267	0,311
176	190	-0,1799	0,1810	-0,0926	48,706	-0,206	0,203
177	181	0,1139	-0,1097	0,1229	9,934	-0,011	0,020
177	182	0,7041	-0,6995	0,7276	3,688	0,161	-0,163
177	189	0,9436	-0,9247	0,8699	6,873	0,296	-0,235
177	190	0,4418	-0,4354	0,4740	8,058	-0,001	-0,011
178	179	-0,0073	0,0073	-0,0450	513,708	-0,016	0,008
178	189	-0,3427	0,3483	-0,3047	11,817	-0,105	0,115
179	189	-0,2500	0,2556	-0,1953	22,748	-0,021	0,017
180	183	0,0261	-0,0259	0,0153	41,160	-0,032	0,032
182	190	0,2795	-0,2787	0,3083	10,478	-0,020	0,017
183	184	-0,2634	0,2667	-0,2758	4,066	0,009	-0,004
184	185	0,0229	-0,0220	0,0263	17,304	-0,049	0,051
185	186	-0,0082	0,0099	-0,0037	59,210	-0,151	0,153
185	187	-0,0899	0,0930	-0,0900	1,533	0,070	-0,065
191	194	-0,6143	0,6225	-0,6530	5,597	0,430	-0,470
193	194	2,3732	-2,3635	2,5222	6,496	0,106	-0,020
193	221	0,1082	-0,1081	-0,0216	119,974	-0,113	0,111
194	195	1,2710	-1,2633	1,4028	10,706	0,232	-0,215
195	196	-0,4967	0,5009	-0,3559	28,653	-0,874	0,908
196	197	0,1098	-0,1098	0,1377	25,396	0,314	-0,309
196	198	-1,2005	1,2029	-1,0903	9,269	-1,919	1,984
196	199	-0,4102	0,4110	-0,3743	8,829	-0,061	-0,784
197	199	-0,4511	0,4518	-0,4352	3,588	-0,195	-0,232
198	216	-2,8765	2,8787	-2,0668	28,175	-2,679	-3,101
199	200	0,5015	-0,5012	0,3312	33,943	0,014	-0,512
199	217	-3,2143	3,2310	-2,9143	9,567	0,362	-0,723
200	202	3,2912	-3,2868	3,1750	3,465	1,415	-2,393
203	204	-2,3891	2,4677	-2,7565	13,511	1,226	-1,178
203	205	-0,3353	0,3439	0,0047	101,383	-2,543	1,705
205	210	-0,3439	0,3454	0,0349	110,124	-1,697	1,758
207	208	-2,2639	2,2731	-2,2718	0,144	-1,046	-0,313
207	210	0,0712	-0,0711	0,0967	35,979	-0,129	0,131
207	213	-0,0372	0,0373	0,0188	150,362	-0,306	-0,571
210	211	5,5290	-5,5229	5,4729	0,959	1,020	-2,307
210	216	-2,3179	2,3196	-3,4303	47,939	-5,632	1,672
211	212	1,0429	-1,0400	1,0400	0,140	0,877	-0,794
213	214	-0,0231	0,0233	0,1016	537,765	1,092	-1,210
213	216	0,2466	-0,2463	0,2306	6,449	-0,659	0,672
214	217	-2,7133	2,7152	-2,5550	5,867	-1,898	1,087
219	230	-0,3309	0,3310	-0,3313	0,104	-0,303	0,294
221	224	0,7219	-0,7172	0,6811	5,349	0,207	-0,158
221	226	1,0862	-1,0724	0,9974	7,588	0,204	-0,114
222	223	0,5765	-0,5712	0,5609	2,266	0,306	-0,291
222	224	0,1835	-0,1813	0,1991	9,185	0,187	-0,175

223	225	0,5712	-0,5631	0,5609	1,107	0,291	-0,268
224	225	0,2118	-0,2111	0,2034	3,799	0,036	-0,032
224	226	0,0767	-0,0764	0,0668	12,752	-0,002	0,004
225	226	0,0041	-0,0041	-0,0057	239,248	-0,029	0,029
226	227	0,5429	-0,5272	0,4485	16,182	-0,224	0,268
227	228	0,0650	-0,0648	0,0600	7,592	-0,015	0,015
228	229	-0,2252	0,2300	-0,2300	1,065	-0,155	0,170
266	270	0,3599	-0,3598	0,3548	1,394	-0,071	0,071
267	273	-0,6070	0,6446	-0,0187	97,007	-0,069	0,283
267	273	-0,6070	0,6446	-0,0187	97,007	-0,069	0,283
267	274	0,2529	-0,0720	0,0718	55,801	-1,575	1,811
268	271	-0,3316	0,3450	-0,0425	87,449	0,066	-0,006
268	271	-0,3316	0,3450	-0,0425	87,449	0,066	-0,006
268	272	-0,3223	0,3286	-0,0323	90,089	0,055	-0,027
268	291	0,0432	-0,0431	0,0428	0,825	0,017	-0,017
269	291	-0,0430	0,0431	-0,0428	0,530	-0,017	0,017
271	272	0,3563	-0,3491	0,0527	85,070	-0,016	0,048
273	299	0,0384	-0,0380	0,0380	0,515	0,014	-0,013
274	276	0,0091	-0,0090	0,0090	0,966	0,004	-0,004
1	3	-0,2772	0,2772	-0,2316	16,447	0,658	-0,633
1	247	-4,6700	4,6700	-4,6700	0,000	-1,048	1,472
2	3	0,3449	-0,3449	0,4200	21,769	0,804	-0,766
2	248	-6,1939	6,2300	-6,2300	0,291	-0,500	1,027
4	3	-7,0607	7,0607	-6,4787	8,243	7,026	-6,556
3	249	-12,1000	12,1000	-12,1000	0,000	-2,567	4,200
5	7	-0,7342	0,7342	-0,7051	3,973	0,721	-0,681
6	7	0,3342	-0,3342	0,4082	22,130	1,039	-0,995
11	10	0,2067	-0,2067	0,2064	0,162	0,138	-0,132
10	12	-1,3233	1,3233	-1,3236	0,025	0,002	0,092
11	250	-2,3400	2,3400	-2,3400	0,000	-0,456	0,565
12	251	-3,7200	3,7200	-3,7200	0,000	-1,564	2,078
15	16	-3,2323	3,2422	-2,8226	12,808	0,370	0,008
17	15	-2,3100	2,5290	-2,3100	4,525	2,723	-2,372
17	252	-3,3000	3,3000	-3,3000	0,000	-3,191	3,500
19	20	-5,1056	5,1056	-5,1905	1,663	0,173	0,213
22	23	-0,7054	0,7054	-0,5771	18,182	0,750	-0,688
22	253	-1,8500	1,8500	-1,8500	0,000	-0,010	0,082
23	254	-4,1000	4,1000	-4,1000	0,000	-0,602	1,093
29	30	-1,1662	1,1662	-1,1166	4,257	-0,494	0,573
266	31	-2,6523	2,6565	-0,3072	88,426	-8,062	8,094
33	255	-5,0000	5,0000	-5,0000	0,000	-0,850	1,584
38	39	-2,6936	2,6936	-2,6184	2,792	-0,598	0,747
38	256	-0,3700	0,3700	-0,3700	0,000	-0,367	0,416
40	39	2,6705	-2,6705	2,5701	3,758	0,623	-0,476
43	257	-4,4049	4,4049	-1,7341	60,631	-0,178	0,397
48	258	-0,4500	0,4500	-0,4500	0,000	-0,203	0,249

49	259	-1,6500	1,6500	-1,6500	0,000	-0,730	0,893
53	54	-0,6757	0,6757	-0,7447	10,201	-0,428	0,466
53	260	-4,0000	4,0000	-4,0000	0,000	-0,806	1,210
54	261	-4,0000	4,0000	-4,0000	0,000	-0,949	1,474
56	55	1,8969	-1,8969	1,8432	2,831	0,143	0,010
57	180	0,4361	-0,4361	0,4253	2,481	-0,050	0,071
59	262	-1,1600	1,1600	-1,1600	0,000	-0,734	0,870
62	61	2,5038	-2,5038	2,4014	4,091	0,854	-0,682
73	68	-2,4998	2,4998	-2,3499	5,996	-0,884	1,021
81	70	-0,8973	0,8973	-0,8587	4,304	0,073	-0,034
83	71	-0,4092	0,4092	-0,4126	0,836	0,220	-0,209
78	72	-0,6396	0,6396	-0,6862	7,283	0,042	-0,023
186	93	0,2001	-0,2001	0,2063	3,088	0,271	-0,255
94	100	-1,7122	1,7122	-1,9208	12,184	2,359	-2,077
103	95	-2,7435	2,7857	-2,6285	4,924	-0,046	0,187
96	138	8,2009	-8,2009	8,6604	5,603	1,120	0,206
136	101	1,3301	-1,3287	1,2907	2,917	0,714	-0,661
103	139	0,8481	-0,8466	0,7836	7,522	0,691	-0,640
110	109	0,4143	-0,4143	0,8168	97,143	-1,649	1,703
129	109	0,8864	-0,8864	1,3801	55,687	-2,081	2,156
109	263	-12,9200	12,9200	-12,9200	0,000	-0,469	3,616
149	111	-1,2612	1,2632	-1,2490	1,043	-0,557	0,638
116	142	-3,0409	3,0522	-1,6273	46,585	0,452	-0,118
118	161	0,8374	-0,8354	0,8862	5,955	-2,466	2,553
118	264	-7,0000	7,0000	-7,0000	0,000	-2,053	2,924
153	120	-0,9573	0,9592	-0,7900	17,559	0,010	0,039
154	121	-1,6850	1,6933	-1,5465	8,445	-0,674	0,847
123	122	-0,4328	0,4328	-0,3449	20,314	-0,470	0,503
127	122	-2,1617	2,1672	-1,9857	8,259	0,207	-0,051
159	124	-2,8793	2,8846	-2,7770	3,640	-1,397	1,591
149	130	-1,5068	1,5096	-1,5190	0,713	-0,593	0,702
162	132	-0,8853	0,8891	-0,8719	1,723	-0,736	0,825
135	134	-1,1158	1,1168	-0,9969	10,692	-0,282	0,316
134	143	-2,4618	2,4695	-2,0573	16,562	1,656	-1,458
145	265	-5,5300	5,5300	-5,5300	0,000	-0,927	1,414
189	168	0,1773	-0,1773	0,1820	2,635	-0,069	0,078
175	172	0,2494	-0,2494	0,2459	1,413	-0,075	0,092
191	174	-1,0718	1,0730	-0,8457	21,138	-0,578	0,631
246	175	-0,4348	0,4349	-0,4289	1,379	-0,196	0,201
177	188	0,4886	-0,4825	0,4843	0,270	0,046	0,003
227	179	0,0274	-0,0274	0,1193	335,949	0,093	-0,091
190	181	0,2703	-0,2703	0,2571	4,888	0,089	-0,079
246	183	0,4348	-0,4307	0,4289	0,908	-0,052	0,094
191	190	1,6861	-1,6769	1,5006	10,758	0,556	-0,518
193	192	-2,7014	2,7200	-2,7200	0,343	-0,158	0,441
198	197	0,7515	-0,7492	0,7225	3,703	1,413	-1,332
216	201	0,7809	-0,7800	0,7800	0,056	0,298	-0,265

203	202	0,9944	-0,9932	1,0692	7,584	0,138	-0,118
210	206	2,3560	-2,3500	2,3500	0,128	1,376	-1,060
209	208	3,4500	-3,4393	3,4500	0,156	0,426	-0,069
215	213	6,0000	-5,9808	6,0000	0,160	3,000	-2,385
216	220	-5,7328	5,7478	-5,7478	0,131	0,815	-0,352
218	217	5,5000	-5,4853	5,5000	0,134	0,684	-0,212
271	266	-1,1289	1,1630	0,0145	101,262	0,315	0,295
273	266	-1,0781	1,1289	0,0331	103,000	0,496	0,416
277	267	-0,0135	0,0142	-0,0135	2,484	0,033	-0,029
280	268	-0,0184	0,0187	-0,0184	0,897	-0,007	0,009
281	268	-0,0139	0,0141	-0,0139	0,689	-0,005	0,006
282	268	-0,0189	0,0193	-0,0189	0,951	-0,007	0,009
283	268	-0,0211	0,0211	-0,0150	29,157	0,012	-0,011
284	268	-0,0166	0,0168	-0,0166	0,577	-0,006	0,007
285	268	-0,0303	0,0305	-0,0303	0,288	-0,010	0,012
286	268	-0,0186	0,0188	-0,0186	0,449	-0,007	0,008
287	268	-0,0258	0,0262	-0,0258	0,741	-0,009	0,012
288	269	-0,0101	0,0101	-0,0101	0,229	-0,004	0,004
289	269	-0,0081	0,0082	-0,0081	0,546	-0,003	0,003
290	269	-0,0160	0,0160	-0,0160	0,152	-0,005	0,006
292	270	-0,3581	0,3603	-0,3581	0,299	0,154	-0,103
293	270	-0,3000	0,3015	-0,3000	0,253	-0,056	0,092
294	270	-0,2767	0,2780	-0,2767	0,233	0,107	-0,076
295	270	0,5000	-0,5000	0,5000	0,000	0,198	-0,158
296	270	0,0800	-0,0800	0,0800	0,000	0,037	-0,031
297	272	-0,0102	0,0103	-0,0102	0,271	-0,004	0,004
298	272	-0,0102	0,0102	-0,0102	0,188	-0,004	0,004
275	274	-0,0153	0,0154	-0,0153	0,410	-0,005	0,006
278	276	-0,0045	0,0045	-0,0045	0,182	-0,002	0,002
279	276	-0,0045	0,0045	-0,0045	0,167	-0,002	0,002
300	294	-0,0119	0,0119	-0,0119	0,000	-0,006	0,006

Estos resultados muestran un error muy similar a los que encontrábamos en la red de 39 nudos. Sin embargo, al existir diferentes niveles de tensión, ocurre algo distinto. En las ramas pertenecientes a zonas de bajas tensiones observamos un error mayor entre utilizar un flujo de cargas con Newton-Raphson o un DCLF. En el siguiente gráfico se observa como para flujos pequeños el error aumenta desproporcionadamente.

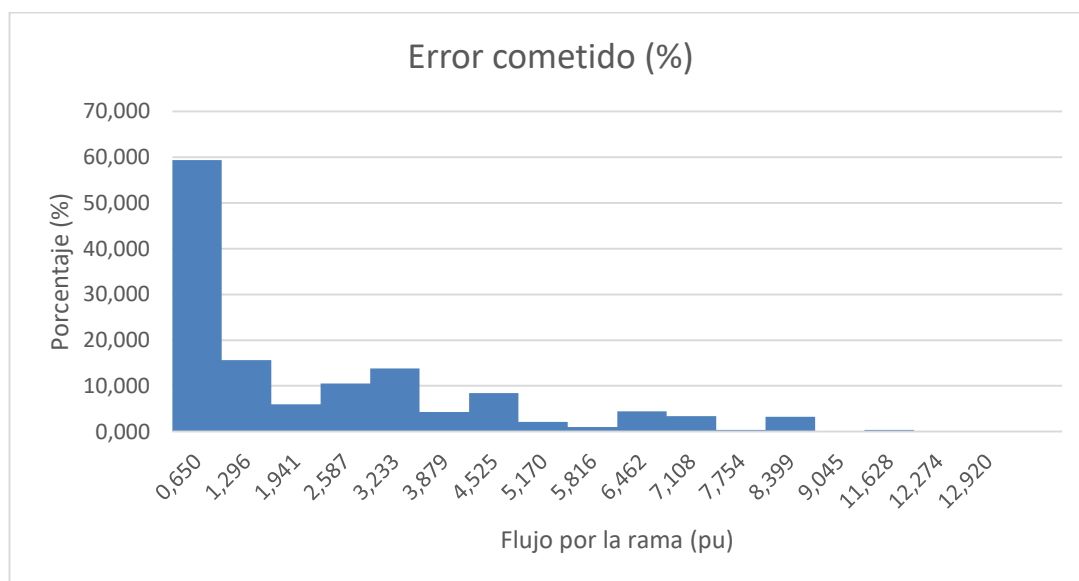


Figura 5-7. Errores cometidos en flujos iniciales con DCLF para red de 300 nudos.

En la Figura 5-7 se observa como para flujos menores a 1 pu el error que se comete al resolver un flujo de cargas mediante DCLF alcanza valores mayores del 50%. Sin embargo, para flujos mayores de 1 pu, el error medio cometido es de entorno al 5%.

Las líneas de baja tensión se caracterizan por soportar menores cargas. Esto quiere decir que, para estas zonas de baja tensión, los resultados obtenidos mediante DCLF no van a ser tan realistas como los que se obtengan en líneas de mayor tensión.

Para esta red, aprovechando su complejidad, también resulta interesante estudiar los tiempos de ejecución de nuestros algoritmos. Como estos tiempos dependen de los procesos que se estén ejecutando en cada momento en el ordenador, vamos realizar múltiples medidas de la duración y vamos a calcular tiempos medios de ejecución.

Esto lo vamos a hacer para conocer el tiempo que tardan nuestros códigos en resolver los dos tipos de flujos de cargas y el tiempo que tardan en resolver los diferentes análisis de contingencias.

En primer lugar, vamos a analizar los tiempos de ejecución de los flujos de carga.

Tabla 5-18 Tiempos de ejecución de flujos iniciales para red de 300 nudos.

	Tiempo de ejecución medio (s)
Newton-Raphson	13123,802 (3 horas, 38 minutos, 44 segundos)
DCLF	8,14

Como vemos en la Tabla 5-18, a pesar de que converge en 4 iteraciones, los tiempos de ejecución del flujo de cargas mediante Newton-Raphson para una red de este tamaño son muy desproporcionados.

A continuación, se muestran los resultados de los tiempos de ejecución para los algoritmos de las contingencias de generadores.

Tabla 5-19 Tiempos de ejecución análisis de contingencias en generadores para red de 300 nudos.

	E1 (s)	E2 (s)	E3 (s)	E4 (s)	MEDIA (s)	%
Lectura de datos	0,486936	0,547674	0,522934	0,569425	0,5317423	5,627
Flujo de cargas inicial	1,002024	0,968201	0,934008	0,957405	0,9654095	10,217
Matriz de admitancias	0,012095	0,006452	0,004096	0,002630	0,0063183	0,067
Matriz de reactancias	0,004309	0,001016	0,002799	0,001283	0,0023517	0,025
Matriz B	0,093999	0,028559	0,015719	0,017832	0,0390273	0,413
Matriz de sensibilidades	0,049308	0,035437	0,044628	0,042241	0,0429035	0,454
Contingencias en generadores	0,065110	0,054222	0,030591	0,025522	0,0438613	0,464
Escritura de resultados en Excel	7,095734	6,634813	7,045759	10,494736	7,8177605	82,733
Total	8,809515	8,276374	8,600534	12,111074	9,4493743	

En la Tabla 5-19 vemos que el proceso de análisis de las 68 contingencias en generadores se completa en 9,4494 segundos de media. También hemos obtenido los tiempos de ejecución para las contingencias en ramas.

Tabla 5-20 Tiempos de ejecución análisis de contingencias en ramas para red de 300 nudos.

	E1 (s)	E2 (s)	E3 (s)	E4 (s)	MEDIA (s)	%
Lectura de datos	0,495650	0,547731	0,647787	1,143818	0,708747	3,178
Flujo de cargas inicial	0,954533	0,979385	1,063609	1,028180	1,0064268	4,512
Matriz de admitancias	0,010025	0,006908	0,003875	0,003205	0,0060033	0,027
Matriz de reactancias	0,005960	0,000980	0,001912	0,001848	0,0026750	0,012
Matriz B	0,065850	0,027211	0,014687	0,015953	0,0309253	0,139
Matrices de sensibilidades	11,597010	9,954404	12,553117	13,077311	11,7954605	52,883
Contingencias en líneas	0,037992	0,017741	0,016038	0,011420	0,0207977	0,093
Escritura de resultados en Excel	7,879666	8,216023	11,175204	7,664395	8,7338220	39,157
Total	21,046686	19,750383	25,476229	22,946130	22,304857	

Para el caso de las contingencias en líneas, como hablamos en el capítulo dedicado a los algoritmos, se recalcula la matriz de sensibilidades para cada contingencia, mientras que en las contingencias de generadores solo se calcula una vez. Como esta red tiene 411 ramas, el tiempo medio de cada contingencia para el cálculo de la matriz de sensibilidades en este caso es de 0,028699 segundos.

A continuación, en las Figuras 5-8 y 5-9 se muestran gráficamente los porcentajes de duración de cada parte de los algoritmos. Para comparar los resultados con mayor claridad, no vamos a tener en cuenta los tiempos de escritura de los resultados. Nos interesa comparar los tiempos empleados desde que leemos los datos hasta que se actualizan los flujos por las ramas.

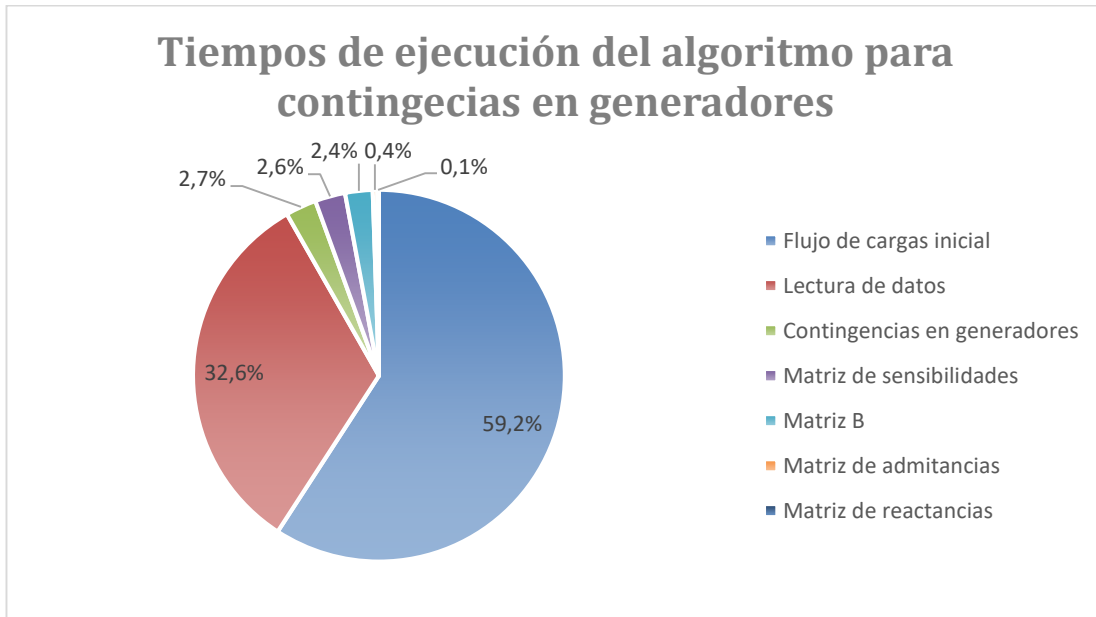


Figura 5-8. Gráfico circular representativo de los tiempos de ejecución para contingencias en generadores en red de 300 nudos.

En la Figura 5-8 apreciamos que, de todo el proceso de resolución de las contingencias en generadores, donde más se ralentiza el código es al inicio, cuando se leen los datos de la red y se calculan los flujos iniciales mediante DCLF. El resto del proceso ha ocupado un 8,2%, que son 0,134462 segundos.

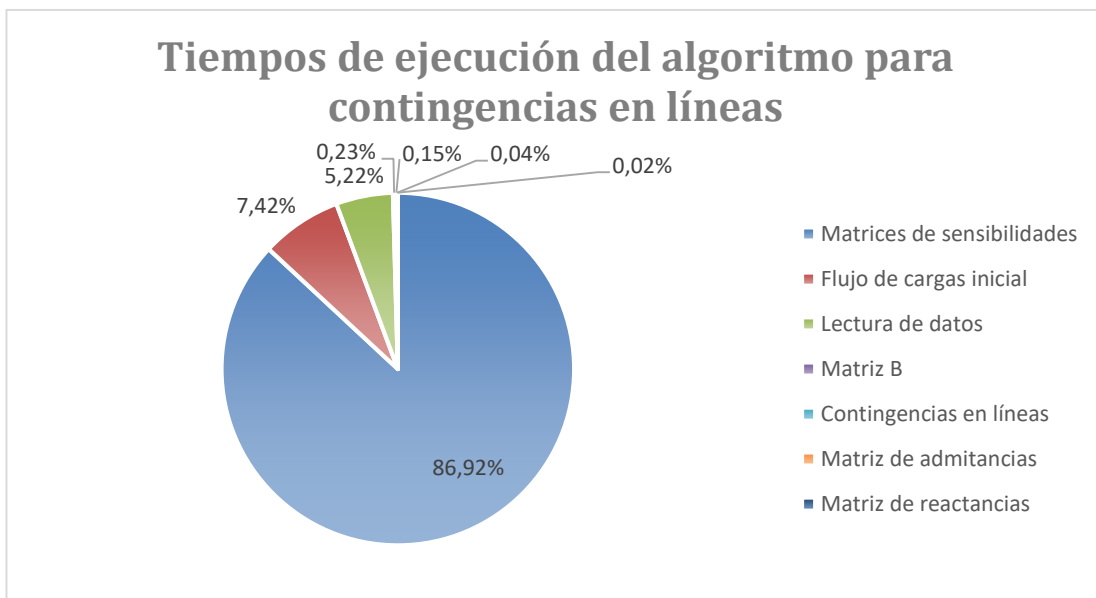


Figura 5-9 Gráfica circular representativo de los tiempos de ejecución para contingencias en líneas en red de 300 nudos.

Para el algoritmo de contingencias en líneas, vemos que ocurre algo distinto. Ahora el proceso más costoso computacionalmente es el cálculo de las matrices de sensibilidades. Como hemos comentado, se recalculan para cada contingencia. En este caso, se haría 411 veces. Es por esto que analizar estas contingencias es más lento cuanto más compleja sea la red. Aun así, logramos obtener los resultados en un tiempo medio total de 22,3049 segundos.

6 CONCLUSIONES

En este proyecto hemos analizado el comportamiento de distintos algoritmos para resolver contingencias en diferentes redes. La diversidad de estas redes nos ha permitido comparar dichos algoritmos en redes de 14 nudos hasta 300 nudos. Estas redes han contado en cada caso con diferentes niveles de tensión y diferentes números de cargas y generadores.

Para la red *IEEE-14* hemos analizado el error cometido entre realizar los flujos de carga iniciales mediante Newton-Raphson y DCLF. También hemos comparado los resultados obtenidos del análisis de contingencias empleando factores de distribución y los obtenidos al ejecutar un flujo de carga con Newton-Raphson donde se ha tenido en cuenta la topología de la contingencia. En la Tabla 6-1 se muestran los errores cometidos al emplear factores de distribución partiendo de los flujos calculados mediante DCLF y mediante Newton-Raphson.

Tabla 6-1 Errores medios cometidos en distintos análisis N-1 para la red IEEE-14.

	<u>Error medio ($\pm\%$)</u>
Contingencias en generadores partiendo de NR	0,653
Contingencias en generadores partiendo de DCLF	11,090
Contingencias en líneas partiendo de DCLF	12,600

En ambos casos, el error medio cometido al no emplear Newton-Raphson es de entorno al 11%. Sabemos que los resultados obtenidos con Newton-Raphson son exactos. Además, a diferencia del resto de métodos, Newton-Raphson proporciona información de las tensiones y de los flujos de potencia reactiva.

Tabla 6-2 Tiempos de ejecución de distintos análisis N-1 completos (generadores y líneas) para la red IEEE-14.

	<u>Tiempos medios de ejecución (s)</u>
Mediante factores de distribución partiendo en generadores de NR	30,758118
Mediante factores de distribución partiendo siempre de DCLF	9,202141
Mediante Newton-Raphson	671,534987

La explicación de la existencia de métodos alternativos a flujos de carga con Newton-Raphson es la reducción del coste computacional de este método. Es un método iterativo, donde se resuelven ecuaciones no lineales. Este normalmente es más lento que los métodos de DCLF y factores de distribución.

Como vemos en la Tabla 6-2, el tiempo medio para obtener los resultados exactos es de 11 minutos y 11 segundos aproximadamente.

En mi opinión, en este caso los tiempos de ejecución obtenidos con Newton-Raphson respecto a los obtenidos con factores de distribución son demasiado grandes. Sin embargo, si tenemos en cuenta que, para contingencias en generadores, resolviendo un solo flujo inicial con Newton-Raphson obtenemos resultados tan exactos, llegamos a la conclusión de que, partiendo de resultados más exactos, los resultados obtenidos con factores de distribución ganan fiabilidad.

Atendiendo a los análisis de contingencias de la red *IEEE-39* hemos obtenido diversas casuísticas. En primer lugar, se comprueba que partimos de un perfil inicial de flujos y tensiones dentro de límites. Sin embargo, hemos detectado varios casos donde se producen sobrecargas, tanto en cuando fallan generadores como cuando se pierden ciertas líneas.

Este ejemplo nos ha servido principalmente para comparar resultados obtenidos mediante factores de distribución con valores muy cercanos al límite de sobrecarga, pero sin rebasarlo. El objetivo ha sido analizar con ayuda de los resultados exactos medidos con Newton-Raphson si realmente la rama se encuentra por debajo del límite o no.

Los resultados nos han demostrado que, cuando falla el generador del nudo 30 y cuando fallan las líneas 6-7 y 16-19 mediante factores de distribución no detectamos sobrecargas, y mediante Newton-Raphson sí. Hemos destacado que, en el caso de los generadores, cuando se parte de un flujo exacto, los resultados se aproximan más a los reales, mientras que, cuando partimos de un flujo calculado mediante DCLF, estos se alejan más.

Tabla 6-3 Errores medios cometidos en distintos análisis N-1 para la red de 39 nudos.

	Error promedio ($\pm\%$)
Contingencias en generador 30 partiendo de NR	5,800
Contingencias en generador 30 partiendo de DCLF	21,100
Contingencias en líneas partiendo de DCLF	23,476

En la Tabla 6-3 observamos un resumen de estos errores. Ahora, el error medio al emplear flujos iniciales exactos se ha multiplicado por 9, mientras que si empleamos flujos iniciales calculados con DCLF el error se multiplica por 2.

Siendo el objetivo de nuestros análisis la detección de sobrecargas, y después de comprobar que mediante factores de distribución el 60% de las sobrecargas que se producen no se detectan satisfactoriamente, en este caso se llega a la conclusión de que los algoritmos donde empleamos los factores de distribución no se cumple dicho objetivo.

En el caso de la red *IEEE-118* nos hemos enfrentado a un ejemplo de red que no ha logrado converger mediante flujos de carga empleando Newton-Raphson. Esto nos ha obligado a analizarla con los flujos de continua. Los resultados que obtenemos del análisis de contingencias muestran una serie de sobrecargas, todas ellas en la zona de 138 kV, donde el límite es 120,81 MW (1,2081 pu). En las ramas pertenecientes a la zona de 345 Kv, donde el límite está en 904,38 MW (9,0438 pu) no se ha detectado ninguna sobrecarga. Al no poder comparar los resultados con los exactos, no sabemos el grado de fiabilidad de estos resultados.

Sin embargo, a partir de las conclusiones a las que llegamos en las redes anteriores, si sabemos que cuando el valor de los flujos es mayor, la fiabilidad de los algoritmos con factores de distribución crece, mientras que cuando los flujos son de valores entorno a la unidad, como es el caso de la zona de 138 kV, los errores cometidos aumentan y la fiabilidad baja.

Por ello, a la hora de analizar una red donde no quede más remedio que emplear el método de continua, debemos tener en cuenta los niveles de tensión para evaluar la fiabilidad de los resultados.

Para la red de 300 nudos, *IEEE-300*, aprovechando su tamaño y complejidad, nos hemos centrado en el estudio de los tiempos de ejecución.

Tabla 6-4 Tiempos de ejecución de flujos iniciales para red de 300 nudos.

	Tiempo de ejecución medio (s)
Newton-Raphson	13123,802 (3 horas, 38 minutos, 44 segundos)
DCLF	8,14

Viendo los resultados de tiempos de ejecución de un flujo de cargas con Newton-Raphson para una red de estas características, a pesar que en este caso la red converja en 4 iteraciones, resulta poco rentable desde el punto de vista del coste computacional analizar este tipo de redes de forma exacta.

Además, hemos analizado los tiempos de ejecución de los análisis de contingencias en generadores y líneas con factores de distribución.

Tabla 6-5 Tiempos de ejecución de análisis de contingencias para red de 300 nudos.

	Tiempo de ejecución medio (s)
FD contingencias en líneas	9,4493743
FD contingencias en generadores	22,3048570
Análisis N-1 completo	31,7542313

Obtenemos que, para una red tan compleja, los tiempos medios de resolución del análisis N-1 completo son de en torno a 31,76 segundos. Como vimos en el caso de la red de 14 nudos, los tiempos medios totales de análisis N-1 completo partiendo también de DCLF en todos los casos fueron de 30,75 segundos.

Con esto llegamos a la conclusión de que, el tiempo de ejecución de los algoritmos donde empleamos factores de distribución apenas se ve influido por la complejidad de la red. Esto con Newton-Raphson no ocurre, ya que hemos visto que los tiempos en este caso van desde los 671,53 segundos para analizar 21 flujos de cargas en la red de 14 nudos, hasta 13123,80 segundos para un solo flujo de cargas en la red de 300 nudos.

Una clara ventaja de los algoritmos basados en flujos de continua, como hemos comprobado, es su bajo coste computacional. Sin embargo, ya sabemos que los resultados no son exactos, a pesar de que existe mayor fiabilidad en los resultados en ramas con flujos altos (mayores a 1 pu). Esto lo hemos comprobado analizando la gráfica de la Figura 5-6. En ella, apreciamos que el error cometido es mayor cuando los flujos se acercan a 1 pu, mientras que para flujos mayores el error va decreciendo. Vemos como, para flujos entre 5 pu y 10 pu el error medio no supera el 5%.

Como vimos en el capítulo 3, donde explicamos en que teoría se basaban nuestros algoritmos, los métodos donde empleamos factores de distribución son métodos, al igual que DCLF, que se centran en la linealidad del subproblema $P - \theta$. Es por esto que, el error cometido al realizar flujos de carga en continua y el cometido al realizar análisis de seguridad mediante factores de distribución es con frecuencia muy similar.

Tabla 6-6 Comparativa errores medios cometidos en distintos análisis para la red *IEEE-14* y la red *IEEE-39*.

	Error promedio ($\pm\%$)	
	<i>IEEE-14</i>	<i>IEEE-39</i>
Flujo de carga DCLF	11,070	18,753
Contingencias en generador partiendo de DCLF	11,090	21,100
Contingencias en líneas partiendo de DCLF	12,600	23,476

Por esto, podemos intuir que el error promedio cometido por los algoritmos de continua en la red *IEEE-300* será también de entorno al 5% para flujos mayores a la unidad y, por lo tanto, estos resultados serán también más fiables que los obtenidos menores a la unidad.

Las conclusiones que hemos sacado sobre los análisis con algoritmos donde empleamos los factores de distribución nos han revelado ventajas y desventajas. Las principales ventajas son:

- Bajo coste computacional. Los algoritmos emplean operaciones básicas con matrices (sumas, restas, inversas, etc.).
- Se ejecutan en tiempos del orden de segundos. Esta ventaja está relacionada con la mencionada anteriormente. El hecho de no necesitar resolver jacobianos simplifica el proceso y reduce los tiempos de ejecución considerablemente.
- A diferencia de los métodos iterativos, los algoritmos de análisis mediante factores de distribución siempre convergen.

Sin embargo, hemos visto que también tienen algunas desventajas:

- La principal desventaja es el error cometido en el cálculo de los flujos debido a las simplificaciones que se tienen en cuenta cuando se linealiza el problema $P - \theta$. Hemos visto que este error depende de varios factores, lo que dificulta estudiar la fiabilidad de los resultados. Sin embargo, una conclusión de nuestros análisis es un aumento del error en ramas con flujos pequeños (por debajo de 100MW).
- Debido al error que se comete, cuando analizamos sobrecargas, en muchos casos no todas las detectaremos satisfactoriamente. Sobre todo, cuando la sobrecarga se encuentre cerca al límite. En ese caso, es más probable que el error no permita la detección de la sobrecarga.

Una solución para este problema sería, en lugar de detectar sobrecargas cuando la rama supera el límite, proponer un límite inferior, por ejemplo, un 5% más bajo. En ese caso, si mediante factores de distribución se detectan sobrecargas, la probabilidad de que la sobrecarga sea real será más alta. Aun así, como hemos visto, no podemos afirmar que la sobrecarga exista, ya que la casuística es muy variada y depende de muchos parámetros que desconocemos.

REFERENCIAS

- [1] R. E. Española, «Descarbonización de la economía,» [En línea].
<https://www.ree.es/es/sostenibilidad/descarbonizacion-de-la-economia/calidad-y-seguridad-del-suministro>.
- [2] R. E. Española, «Refuerzo de las interconexiones,» [En línea].
<https://www.ree.es/es/red21/refuerzo-de-las-interconexiones>.
- [3] A. Gómez Expósito, «Análisis y operación de sistemas de energía eléctrica,» 2002.
- [4] T. A. U. E. G. Datasets, «Electric Grid Test Case Repository,» [En línea].
<https://electricgrids.engr.tamu.edu/>.

