

- Tesis Doctoral -



*OPTIMIZACIÓN DE LA CONFIGURACIÓN DE REDES DE
DISTRIBUCIÓN UTILIZANDO TÉCNICAS HEURÍSTICAS PURAS
BASADAS EN EL SENTIDO DEL FLUJO DE POTENCIA POR LAS LÍNEAS*

Antonio José Gil Mena

Algeciras, abril de 2010



*OPTIMIZACIÓN DE LA CONFIGURACIÓN DE REDES DE
DISTRIBUCIÓN UTILIZANDO TÉCNICAS HEURÍSTICAS PURAS
BASADAS EN EL SENTIDO DEL FLUJO DE POTENCIA POR LAS LÍNEAS*

por:

Antonio José Gil Mena

Director:

Juan Andrés Martín García

Algeciras, abril de 2010

UNIVERSIDAD DE CÁDIZ

ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA INDUSTRIAL E INGENIERÍA CIVIL

*OPTIMIZACIÓN DE LA CONFIGURACIÓN DE REDES DE DISTRIBUCIÓN UTILIZANDO
TÉCNICAS HEURÍSTICAS PURAS BASADAS EN EL SENTIDO DEL FLUJO DE POTENCIA
POR LAS LÍNEAS*

Por Antonio José Gil Mena

Vº. Bº Director de la Tesis

Fdo.: Juan Andrés Martín García

Trabajo presentado para aspirar al grado de Doctor por la Universidad de Cádiz.

*A mis padres, verdaderos artífices de mi formación,
por su esfuerzo y sacrificio personal.*

A Noelia y Lucía, mis amadas hijas.

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar es mi deseo, agradecer a mi director de tesis, D. Juan Andrés Martín García, no sólo la dirección de la misma sino su colaboración y trabajo realizado, ya que más allá de la dirección ha sido un verdadero compañero de trabajo.

También quisiera dejar una reseña especial para aquéllos compañeros y amigos con los que comparto el día a día, y que forman un apoyo muy importante para continuar esforzándome y conseguir objetivos cada vez mayores y satisfactorios.

ÍNDICE

Índice de contenidos

AGRADECIMIENTOS	VII
ÍNDICE	IX
CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN	1
1.1 Definición del problema	2
1.2 Objetivo	4
1.3 Estructura	4
CAPÍTULO 2 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	7
2.1 Optimización junto con técnicas heurísticas	7
2.1.1 El algoritmo de Merlin y Back (1975)	8
2.1.2 El algoritmo de Shirmohammadi y Hong (1989)	8
2.1.3 Liu et al. (1989)	9
2.1.4 Glamocanin (1990)	10
2.1.5 Huddleston et al. (1990)	10
2.1.6 Chian y Jean Jumeau (1990)	11
2.1.7 Wagner et al. (1991)	11
2.1.8 Goswami y Basu (1992)	11
2.1.9 Borozaan et al. (1995)	12
2.1.10 Sarfi et al. (1996)	12
2.1.11 Wang et al. (1996)	12
2.1.12 Roytelman et al. (1996)	13
2.1.13 Ramos et al. (2005)	13
2.1.14 Schmidt et al. (2005)	13
2.1.15 Gomes et al (2006)	14
2.2 Técnicas heurísticas	15
2.2.1 El algoritmo de Civanlar et al. (1988)	15
2.2.2 Baran y Wu (1989)	17
2.2.3 Taylor y Lubkeman (1990)	17
2.2.4 Castro y Watanabe (1990)	18
2.2.5 Jasmon y Callistus (1991)	18
2.2.6 Lee et al. (1994)	19
2.2.7 Augugliaro et al. (1995)	20

2.2.8 Broadwater et al. (1996)	21
2.2.9 Fan et al (1996)	22
2.2.10 Lin y Chin (1998)	23
2.2.11 McDermot et al. (1999)	24
2.2.12 Kashem et al. (2000)	24
2.2.13 Kashem et al. (2001)	25
2.2.14 Gohokar et al (2003)	26
2.2.15 Gomes et al. (2005)	26
2.2.16 Raju y Bijwe (2008)	26
2.3 Técnicas basadas en inteligencia artificial	27
2.3.1 Redes neuronales en optimización combinatoria	27
Kim et al. (1993)	27
Hsu et al. (1995)	27
Kashem et al. (1998)	28
Salazar et al. (2006)	28
2.3.2 Computación evolutiva	28
Song et al. (1997)	29
Lin et al. (2000)	29
Zhu (2002)	29
Huang (2002)	29
Su y Lee (2003)	30
Venkatesh y Ranjan. (2003)	30
Venkatesh et al. (2004)	30
Delbem et al (2005)	30
Prasad et al. (2005)	31
Chiou et al. (2005)	31
2.3.3 Inteligencia colectiva (colonia de hormigas)	31
Su et al. (2005)	31
2.3.4 Sistemas expertos	31
Chang et al. (1990)	31
Jung et al. (1993)	32
Das (2006)	32
2.4 Otras técnicas	32
2.4.1 Técnica del recocido simulado	32
Chang y Kuo (1994)	32
Dan Jiang y Baldick (1996)	33
Jeon et al. (2002)	33
Jeon y Kim (2004)	34
2.4.2 Búsqueda Tabú	34
Cherkaoui et al. (1993)	34
Zhang et al (2006)	35
2.4.3 Programación no lineal entera-mixta	35
Sarma y Prakasa Rao (1995)	35
Ali Abur (1996)	35
2.5 Clasificación de los algoritmos	35
2.5.1 Algoritmos que parten de la red mallada	36
2.5.2 Algoritmos que parten de la red radial	36
2.5.3 Algoritmos híbridos	37
2.5.4 Otros algoritmos	37
2.6 Consideraciones asociadas a la reconfiguración	37
2.6.1 La coordinación de la protección y la reconfiguración	38

2.6.2 Estableciendo una reconfiguración propuesta	38
2.6.3 La frecuencia de las operaciones de reconfiguración	39
CAPÍTULO 3 TÉCNICA HEURÍSTICA BASADA EN NUDOS DE RUPTURA	41
3.1 Estudio de una red DC con un solo lazo	42
3.2 Análisis de una red de alterna	47
3.3 Selección de la heurística	49
3.3.1 Análisis de los nudos de ruptura	49
3.3.2 Selección de las ramas candidatas	50
Asociación de pares de nudos P y Q: Nudos P-Q	51
Grafo dirigido único para los flujos de activa y reactiva: Nudos PQ	53
CAPÍTULO 4 ALGORITMOS	55
4.1 Algoritmos mallados	56
4.1.1 Algoritmo mallado M-01	58
4.1.2 Algoritmo mallado M-01 iterativo	59
4.1.3 Algoritmo mallado M-02	60
4.1.4 Algoritmo mallado M-02 iterativo	61
4.1.5 Algoritmo mallado M-02 variante 1	62
4.1.6 Algoritmo mallado M-02 variante 2	63
4.1.7 Algoritmo mallado M-02 variante 3	64
4.1.8 Algoritmo mallado M-02 variante 4	65
4.1.9 Algoritmo mallado M-02 variante 5	66
4.1.10 Algoritmo mallado M-03	67
4.1.11 Algoritmo mallado M-03 iterativo	68
4.1.12 Algoritmo mallado M-04	69
4.1.13 Algoritmo mallado M-04 iterativo	70
4.2 Algoritmos radiales	71
4.2.1 Algoritmo radial R-01	73
4.2.2 Algoritmo radial R-02	74
4.2.3 Algoritmos radiales R-01 y R-02 variante 1	75
4.2.4 Algoritmos radiales R-01 y R-02 variante 2	76
4.3 Algoritmo radiales en serie	77
4.4 Algoritmos híbridos	77
4.5 Algoritmos híbridos con reinicio	77
CAPÍTULO 5 MÉTODOS DE RESOLUCIÓN DE LOS REPARTOS DE CARGA	79
5.1 Método de desajuste de potencias	80
5.2 Método de desajuste de corrientes	83
CAPÍTULO 6 RESULTADOS	87
6.1 Redes de test	88
6.2 Análisis de los resultados obtenidos para los diferentes algoritmos	89
6.2.1 Análisis de los algoritmos mallados	92
6.2.2 Análisis de los algoritmos radiales	95
6.2.3 Análisis de los algoritmos híbridos e híbridos con reinicio	98
6.2.4 Resumen final	101
6.3 Resultados de los métodos de resolución de los repartos de carga	103
6.4 Resultados de los algoritmos frente a los métodos de repartos de carga	104

CAPÍTULO 7 CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS	108
APÉNDICES	111
7.1 Datos de las redes de test	111
7.1.1 Red de 10 nudos (Glamocanin)	112
7.1.2 Red de 14 nudos (Civanlar et al.)	113
7.1.3 Red de 16 nudos (Ali Abur)	114
7.1.4 Red de 33 nudos (Baran y Wu)	115
7.1.5 Red de 69 nudos (Chiang y Jean Jumeau)	117
7.1.6 Red de 69 nudos (Das)	120
7.1.7 Red de 84 nudos (Su y Lee)	124
7.1.8 Red de 118 nudos (Zhang)	128
7.1.9 Red de 137 nudos (Ramos et al.)	133
7.1.10 Red de 205 nudos (Ramos et al.)	138
7.1.11 Red de 273 nudos	146
7.2 Tablas de resultados	156
7.2.1 Tablas de resultados ordenados por algoritmo para cada red de test	156
Algoritmos mallados	157
Algoritmos radiales	163
Algoritmos híbridos	167
Algoritmos híbridos con reinicio	171
7.2.2 Tablas del índice de tiempos e índice de repartos de carga	175
7.2.3 Resultados de los diferentes métodos de reparto de cargas	178
7.2.4 Tablas de resultados ante diferentes métodos de reparto de cargas	180
Algoritmos mallados	180
Algoritmos radiales	186
Algoritmos híbridos	190
Algoritmos híbridos con reinicio	194
BIBLIOGRAFÍA	199

Índice de figuras

Figura 1 Grafo dirigido de una red DC de un solo lazo	42
Figura 2 Grafo dirigido de la red radial equivalente de una red DC de un solo lazo	43
Figura 3 Grafo dirigido de una red AC. (a) potencia activa y (b) potencia reactiva	44
Figura 4 Corrientes por la red radial. (a) red radial, (b) red mallada y (c) red compensada	45
Figura 5 Nudos de ruptura de activa y reactiva	52
Figura 6 Sentido del flujo de potencia	53
Figura 7 Grafo dirigido único para los flujos de activa y reactiva	54
Figura 8 Calidad versus rapidez de los algoritmos más prometedores	102
Figura 9 Grafo de la red de 10 nudos (Glamocanin)	112
Figura 10 Grafo de la red de 14 nudos (Civanlar et al.)	113
Figura 11 Red de 16 nudos (Ali Abur)	114
Figura 12 Red de 33 nudos (Baran y Wu)	115
Figura 13 Red de 69 nudos (Chiang y Jean Jumeau)	117
Figura 14 Red de 69 nudos (Das)	120
Figura 15 Red de 84 nudos (Su y Lee)	124
Figura 16 Red de 118 nudos (Zhang)	128
Figura 17 Red de 137 nudos (Ramos et al.)	133
Figura 18 Red de 205 nudos (Ramos et al.)	138
Figura 19 Red de 273 nudos	146

Índice de tablas

Tabla 1 Nudos de ruptura y grados de entrada	51
Tabla 2 Emparejamientos de nudos de ruptura P y Q	53
Tabla 3 Nudos de ruptura PQ y sus ramas candidatas	54
Tabla 4 Algoritmos mallados	57
Tabla 5 Algoritmos radiales	72
Tabla 6 Datos característicos de las redes de test	88
Tabla 7 Mejor solución publicada en la literatura técnica de las redes de test	90
Tabla 8 Mejor solución obtenida de las redes de test	90
Tabla 9 Número de repartos de carga algoritmos mallados	93
Tabla 10 Índice de pérdidas de los algoritmos mallados para cada red de test	94
Tabla 11 Ordenación de los algoritmos mallados en cuanto a tiempo de ejecución	95
Tabla 12 Configuración radial inicial para los algoritmos radiales	96
Tabla 13 Ordenación de los algoritmos radiales en cuanto a tiempo de ejecución	96
Tabla 14 Índice de pérdidas de los algoritmos radiales para cada red de test	97
Tabla 15 Ordenación de los algoritmos híbridos e híbridos con reinicio por tiempo de ejecución	98
Tabla 16 Índice de pérdidas de los algoritmos híbridos para cada red de test	99
Tabla 17 Índice de pérdidas de los algoritmos híbridos con reinicio para cada red de test	100
Tabla 18 Índice de calidad de potencia para los algoritmos	101
Tabla 19 Errores de las pérdidas para las redes de test frente a los métodos de repartos de carga	103
Tabla 20 Errores de las tensiones (red de Baran y Wu) frente a los métodos de repartos de carga	103
Tabla 21 Comparación algoritmos mallados	105
Tabla 22 Comparación algoritmos radiales	105
Tabla 23 Comparación algoritmos híbridos	105
Tabla 24 Comparación algoritmos híbridos con reinicio	106
Tabla 25 Recuento de resultados	106
Tabla 26 Datos de la red de 10 nudos (Glamocanin)	112
Tabla 27 Red de 14 nudos (Civanlar et al.)	113
Tabla 28 Red de 16 nudos (Ali Abur)	114
Tabla 29 Red de 33 nudos (Baran y Wu). Parte 1 de 2	115
Tabla 30 Red de 69 nudos (Chiang y Jean Jumeau). Parte 1 de 3	117
Tabla 31 Red de 69 nudos (Das). Parte 1 de 3	121
Tabla 32 Red de 84 nudos (Su y Lee). Parte 1 de 3	125
Tabla 33 Red de 118 nudos (Zhang). Parte 1 de 4	129
Tabla 34 Red de 137 nudos (Ramos et al.). Parte 1 de 4	134
Tabla 35 Red de 205 nudos (Ramos et al.). Parte 1 de 7	139
Tabla 36 Red de 273 nudos. Parte 1 de 9	147
Tabla 37 Resultados algoritmo M-01	157

Tabla 38 Resultados algoritmo M-01 iterativo	157
Tabla 39 Resultados algoritmo M-02	158
Tabla 40 Resultados algoritmo M-02 iterativo	158
Tabla 41 Resultados algoritmo mallado M-02 variante 1	159
Tabla 42 Resultados algoritmo mallado M-02 variante 2	159
Tabla 43 Resultados algoritmo mallado M-02 variante 3	160
Tabla 44 Resultados algoritmo mallado M-02 variante 4	160
Tabla 45 Resultados algoritmo mallado M-02 variante 5	161
Tabla 46 Resultados algoritmo mallado M-03	161
Tabla 47 Resultados algoritmo mallado M-03 iterativo	162
Tabla 48 Resultados algoritmo mallado M-04	162
Tabla 49 Resultados algoritmo mallado M-04 iterativo	163
Tabla 50 Resultados algoritmo R-01	163
Tabla 51 Resultados algoritmo radial R-01 variante 1	164
Tabla 52 Resultados algoritmo radial R-01 variante 2	164
Tabla 53 Resultados algoritmo radial R-02	165
Tabla 54 Resultados algoritmo radial R-02 variante 1	165
Tabla 55 Resultados algoritmo radial R-02 variante 2	166
Tabla 56 Resultados algoritmo radial encadenado R-01 plus R-02	166
Tabla 57 Resultados algoritmo híbrido M-01 / R-01	167
Tabla 58 Resultados algoritmo híbrido M-01 / R-02	167
Tabla 59 Resultados algoritmo híbrido M-02 / R-01	168
Tabla 60 Resultados algoritmo híbrido M-02 / R-02	168
Tabla 61 Resultados algoritmo híbrido M-03 / R-01	169
Tabla 62 Resultados algoritmo híbrido M-03 / R-02	169
Tabla 63 Resultados algoritmo híbrido M-04 / R-01	170
Tabla 64 Resultados algoritmo híbrido M-04 / R-02	170
Tabla 65 Resultados algoritmo híbrido con reinicio M-01 / R-01	171
Tabla 66 Resultados algoritmo híbrido con reinicio M-01 / R-02	171
Tabla 67 Resultados algoritmo híbrido con reinicio M-02 / R-01	172
Tabla 68 Resultados algoritmo híbrido con reinicio M-02 / R-02	172
Tabla 69 Resultados algoritmo híbrido con reinicio M-03 / R-01	173
Tabla 70 Resultados algoritmo híbrido con reinicio M-03 / R-02	173
Tabla 71 Resultados algoritmo híbrido con reinicio M-04 / R-01	174
Tabla 72 Resultados algoritmo híbrido con reinicio M-04 / R-02	174
Tabla 73 Índices de tiempo de CPU para los algoritmos mallados	175
Tabla 74 Índices de tiempo de CPU para los algoritmos radiales	175
Tabla 75 Índices de tiempo de CPU para los algoritmos híbridos	175
Tabla 76 Índices de tiempo de CPU para los algoritmos híbridos con reinicio	176

Tabla 77 Índices de número de repartos de carga para los algoritmos mallados	176
Tabla 78 Índices de número de repartos de carga para los algoritmos radiales	176
Tabla 79 Índices de número de repartos de carga para los algoritmos híbridos	177
Tabla 80 Índices de número de repartos de carga para los algoritmos híbridos con reinicio	177
Tabla 81 Ordenación de los algoritmos en cuanto a tiempo de ejecución/repartos de carga	177
Tabla 82 Pérdidas (MW) para las redes de test frente a los métodos de repartos de carga	178
Tabla 83 Tensiones (módulo) para la red de test de 33 nudos “red33bw”	179
Tabla 84 Comparativa métodos reparto de carga. Algoritmo mallado M-01	180
Tabla 85 Comparativa métodos reparto de carga. Algoritmo mallado M-01 iterativo	180
Tabla 86 Comparativa métodos reparto de carga. Algoritmo mallado M-02	181
Tabla 87 Comparativa métodos reparto de carga. Algoritmo mallado M-02 iterativo	181
Tabla 88 Comparativa métodos reparto de carga. Algoritmo mallado M-02 variante 1	182
Tabla 89 Comparativa métodos reparto de carga. Algoritmo mallado M-02 variante 2	182
Tabla 90 Comparativa métodos reparto de carga. Algoritmo mallado M-02 variante 3	183
Tabla 91 Comparativa métodos reparto de carga. Algoritmo mallado M-02 variante 4	183
Tabla 92 Comparativa métodos reparto de carga. Algoritmo mallado M-02 variante 5	184
Tabla 93 Comparativa métodos reparto de carga. Algoritmo mallado M-03	184
Tabla 94 Comparativa métodos reparto de carga. Algoritmo mallado M-03 iterativo	185
Tabla 95 Comparativa métodos reparto de carga. Algoritmo mallado M-04	185
Tabla 96 Comparativa métodos reparto de carga. Algoritmo mallado M-04 iterativo	186
Tabla 97 Comparativa métodos reparto de carga. Algoritmo radial R-01	186
Tabla 98 Comparativa métodos reparto de carga. Algoritmo radial R-01 variante 1	187
Tabla 99 Comparativa métodos reparto de carga. Algoritmo radial R-01 variante 2	187
Tabla 100 Comparativa métodos reparto de carga. Algoritmo radial R-02	188
Tabla 101 Comparativa métodos reparto de carga. Algoritmo radial R-02 variante 1	188
Tabla 102 Comparativa métodos reparto de carga. Algoritmo radial R-02 variante 2	189
Tabla 103 Comparativa métodos reparto de carga. Algoritmo radial encadenado R-01 plus R-02	189
Tabla 104 Comparativa métodos reparto de carga. Algoritmo híbrido M-01 / R-01	190
Tabla 105 Comparativa métodos reparto de carga. Algoritmo híbrido M-01 / R-02	190
Tabla 106 Comparativa métodos reparto de carga. Algoritmo híbrido M-02 / R-01	191
Tabla 107 Comparativa métodos reparto de carga. Algoritmo híbrido M-02 / R-02	191
Tabla 108 Comparativa métodos reparto de carga. Algoritmo híbrido M-03 / R-01	192
Tabla 109 Comparativa métodos reparto de carga. Algoritmo híbrido M-03 / R-02	192
Tabla 110 Comparativa métodos reparto de carga. Algoritmo híbrido M-04 / R-01	193
Tabla 111 Comparativa métodos reparto de carga. Algoritmo híbrido M-04 / R-02	193
Tabla 112 Comparativa métodos reparto de carga. Algoritmo híbrido con reinicio M-01 / R-01	194
Tabla 113 Comparativa métodos reparto de carga. Algoritmo híbrido con reinicio M-01 / R-02	194
Tabla 114 Comparativa métodos reparto de carga. Algoritmo híbrido con reinicio M-02 / R-01	195
Tabla 115 Comparativa métodos reparto de carga. Algoritmo híbrido con reinicio M-02 / R-02	195

Tabla 116 Comparativa métodos reparto de carga. Algoritmo híbrido con reinicio M-03 / R-01	196
Tabla 117 Comparativa métodos reparto de carga. Algoritmo híbrido con reinicio M-03 / R-02	196
Tabla 118 Comparativa métodos reparto de carga. Algoritmo híbrido con reinicio M-04 / R-01	197
Tabla 119 Comparativa métodos reparto de carga. Algoritmo híbrido con reinicio M-04 / R-02	197

Capítulo 1

INTRODUCCIÓN

Los sistemas de suministro eléctrico son los encargados de generar, transmitir y distribuir la energía eléctrica desde los centros de generación a los consumidores finales.

En el pasado, la generación y los sistemas de transmisión recibieron una mayor atención frente al sistema de distribución. Actualmente, gracias a las herramientas y aplicaciones informáticas se poseen mayores facilidades para hacer frente a la carga computacional de los sistemas de distribución en cuanto a modelado y simulación.

La sociedad, cada vez más dependiente de un suministro eléctrico más eficiente, ha provocado que el sistema de distribución emerja como el enlace crítico entre el suministro y el consumidor final.

En el ámbito de la distribución, diferentes estudios indican que hasta el 10 % de la generación total de potencia se desaprovecha en pérdidas en las líneas de transmisión. Es por ello, que se estudie e investigue cada método o técnica capaz de reducir las pérdidas en el sistema de distribución.

Hoy en día, un parámetro a tener cada vez más en cuenta, es la calidad del servicio eléctrico de los sistemas de distribución de media tensión. Un fallo en el sistema modifica severamente los índices de calidad de la empresa distribuidora, generando con ello importantes pérdidas económicas.

Existen muchas alternativas disponibles para reducir las pérdidas en el nivel de distribución: la reconfiguración de la red, la instalación de condensadores, el equilibrado de las cargas y la introducción de niveles más altos de tensión. A pesar de los numerosos métodos existentes para reducir las pérdidas, las empresas de distribución se encuentran en una postura reacia para adoptar medidas que conlleven un desembolso financiero considerable.

En ciertos casos, el equipo instalado para la reducción de pérdidas puede tener una mala relación coste/eficiencia, o puede tener una influencia negativa sobre la fiabilidad del sistema.

La llegada de los sistemas de control supervisor y de adquisición de datos (SCADA) ha permitido monitorear remotamente los elementos vitales que controlan la red de distribución.

Merlin y Back [49], en 1975, fueron los primeros que propusieron el concepto de utilizar interruptores para reconfigurar el sistema de distribución de forma que se minimizaran las pérdidas de transmisión durante una condición específica de carga. A partir de ellos, se han propuesto numerosos métodos para resolver el problema intentando obtener una solución óptima en un tiempo razonable.

1.1 Definición del problema

Las redes eléctricas de distribución se diseñan con una topología tal, de forma que se encuentran débilmente malladas. Sin embargo su operación es radial, es decir, no es posible alimentar a una carga mediante dos alimentadores diferentes. Esta disposición radial permite un dimensionamiento y coste de los elementos de protección más económicos que si la explotación fuese con la red mallada.

En una configuración radial donde se alimenta a todas las cargas, en un momento determinado puede ocurrir un fallo en alguna de las líneas. Con el objeto de restablecer el servicio, es necesario cerrar otra línea de la red que alimente a los receptores que ha dejado sin servicio la línea en la que se ha disparado la protección. Ante esta situación existen varias soluciones, es decir, varias configuraciones radiales que permiten dar suministro a todas las cargas.

El problema de reconfiguración intenta obtener la red radial que alimenta a todos los receptores y que a su vez posea las menores pérdidas en las líneas.

Concluyendo, nos encontramos ante un problema de minimización de pérdidas sujeto a un conjunto de restricciones como son:

- Ecuaciones del flujo de potencia de la red.
- Dar servicio a todas las cargas.
- Mantener las líneas dentro de sus capacidades.
- Mantener las tensiones en los nudos dentro de sus límites.

El problema de reconfiguración es similar a un cálculo óptimo de flujo de potencia (OPF), pero con la diferencia que presenta una carga computacional considerablemente mayor debido a la inclusión de variables adicionales para dar cuenta del estado del interruptor y las restricciones de radialidad de la red.

El problema puede ser expresado matemáticamente como:

$$\min \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n C_{ij} L_{ij} \quad (1)$$

Sujeto a:

$$\sum_{i=1}^n S_{ij} = D_j \quad (2)$$

$$S_{ij} \leq S_{ij,\max} \quad (3)$$

$$\Delta U_{ij} \leq \Delta U_{ij,\max} \quad (4)$$

$$\sum_{\forall f_T} S_{f_T} = S_{f_T \max} \quad (5)$$

$$\prod_{\forall f_T} \lambda_{f_T} = 1 \quad (6)$$

Los parámetros de las ecuaciones se definen como:

C_{ij}	Coeficiente de peso de pérdidas en la línea ij
L_{ij}	Pérdidas de la línea ij
S_{ij}	Potencia que fluye por la línea ij
D_j	Demanda de potencia del nudo j
ΔU_{ij}	Caída de tensión en la línea ij
S_{f_T}	Flujo de potencia para el alimentador f_T
f_T	Subconjunto de alimentadores suministrados por el transformador T
λ_{f_T}	1 si el alimentador f_T está abierta, 0 si está cerrado

En la formulación del problema de reconfiguración, la función objetivo (1) representa la pérdida total del sistema de distribución. Una simplificación muy extendida es considerar sólo la contribución de la componente real de la corriente para las pérdidas, e ignorar la contribución reactiva.

La ecuación (2) asegura que se satisfaga la demanda de carga en los nudos. Las ecuaciones (3) y (4) aseguran las restricciones de capacidad de las líneas y los niveles de tensión máximos en los nudos. La ecuación (5) asegura que los nudos conectados al transformador (alimentador) funcionan dentro de la capacidad especificada. Por último, mediante la ecuación (6) se asegura la condición de radialidad de la red.

El problema de reconfiguración de distribución es claramente un problema de programación no lineal entera-mixta. El problema generalizado de reconfiguración presenta una carga computacional considerable para un sistema de distribución de hasta proporciones moderadas. Además, si los equipos de las líneas; como los transformadores, los condensadores o los reguladores, se agregan a la red, entonces el problema quizá nunca convergería.

La relajación de este tipo de problemas no es apropiada debido al significado físico de los interruptores. La naturaleza no lineal del sistema de distribución necesita que en cada iteración de un algoritmo de optimización, se realice una operación de cálculo del flujo de carga para determinar el punto de operación del sistema resultante al reconfigurar la red.

Con las instalaciones disponibles hoy en día, el análisis de flujo de carga puede ser realizado de una manera eficiente y rápida, pero el cálculo de numerosos flujos de carga de forma

sucesiva representa un procedimiento que consume mucho tiempo. Para reducir el tiempo, algunos investigadores han derivado fórmulas empíricas para evaluar la reducción de pérdidas debida a una operación particular de conmutación o intercambio de ramas.

La definición del problema de reconfiguración de esta manera es típica de algoritmos de reconfiguración propuestos hasta la fecha. Las técnicas propuestas de reconfiguración hacen uso de formulaciones similares, pero utilizan métodos diferentes de solución e introducen simplificaciones a través del uso de heurísticas.

1.2 Objetivo

En la literatura técnica existen numerosos trabajos para resolver el problema de reconfiguración de redes de distribución. El objetivo de todos los métodos existentes consiste en lograr una solución cerca del óptimo global en un tiempo de computación razonable. Existe por tanto, un compromiso entre la calidad de la solución y el esfuerzo computacional para obtener dicha solución.

En todos los métodos propuestos hasta la fecha, y en aras de conseguir una solución aceptable se hace uso de simplificaciones razonadas, es decir, aproximaciones que permitan alcanzar el compromiso anteriormente expuesto.

De entre los enfoques que se plantean a la hora de reducir la fuerte combinatoria del problema, existe uno que permite mejorar el esfuerzo computacional de forma considerable. Consiste en buscar un conjunto de reglas heurísticas basadas en el conocimiento del problema. Evidentemente, la calidad de la solución alcanzada depende fuertemente de la calidad de la heurística.

El objetivo general de esta de tesis consiste en la búsqueda de una configuración (reconfiguración) de una red de distribución dada que minimice las pérdidas del sistema de distribución, mediante la aplicación de distintas técnicas heurísticas.

1.3 Estructura

La primera fase de este trabajo (Capítulo 2) ha consistido en una búsqueda en la literatura técnica de los diferentes enfoques y métodos planteados para resolver el problema de reconfiguración de redes de distribución. Ello ha permitido clasificar los métodos en grupos con características similares en cuanto a la calidad de la solución.

Tras el análisis de los diferentes métodos, y la elección dentro de los métodos que usan una heurística para reducir el espacio de búsqueda, en el Capítulo 3 se ha planteado la base de la heurística propuesta en esta tesis.

Atendiendo a la filosofía de la heurística planteada, en el Capítulo 4 se ha propuesto un conjunto de algoritmos basados todos en dicha heurística.

Un factor determinante en la rapidez de ejecución de los algoritmos es el tiempo en resolver las redes. En el Capítulo 5 se presentan e introducen algunos métodos de resolución aproximados para las redes de distribución.

Es en el Capítulo 6 donde se exponen los resultados obtenidos con los diferentes algoritmos, así como el uso de los métodos de resolución planteados en el capítulo anterior.

El resumen de las conclusiones obtenidas, como consecuencia de los diferentes algoritmos, se expone en el Capítulo 7 . Seguidamente se ha incluido unos apéndices con información específica no tratada en los capítulos anteriores por su extensión.

Por último, se relaciona por orden alfabético la bibliografía consultada y utilizada para la realización de esta tesis.

Capítulo 2

REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

Antes de comenzar con el estudio del problema es necesario conocer cómo se encuentra resuelto dicho problema en la literatura técnica. Para ello, en este capítulo se han recogido las diferentes técnicas utilizadas para resolver el problema de la reconfiguración de redes minimizando las pérdidas en las líneas.

Las técnicas de optimización existentes en la literatura técnica aplicadas al problema de reconfiguración de redes son bastantes extensas. Una clasificación de las mismas, bien podría ser:

- Técnicas que utilizan la programación matemática para resolver un problema de optimización junto con heurísticas para limitar el espacio de búsqueda.
- Técnicas que plantean sólo reglas heurísticas para la búsqueda de una solución.
- Técnicas basadas en inteligencia artificial.
- Otras técnicas: Un conjunto de métodos que no se clasifican en los apartados anteriores.

A continuación se exponen y comentan las técnicas o métodos más representativos encontrados en la literatura.

2.1 Optimización junto con técnicas heurísticas

La reconfiguración de los sistemas de distribución con el objeto de reducir las pérdidas fue primeramente propuesto por Merlin y Back [49]. Hicieron uso de una mezcla de optimización y heurísticas para determinar la configuración de mínimas pérdidas para un sistema de distribución determinado. El uso de heurísticas se justificó por la necesidad de reducir la magnitud del problema de reconfiguración, dado que las propiedades de convergencia del problema de optimización no lineal aplicadas a sistemas de distribución grandes ofrecían un resultado pésimo para implementaciones en tiempo real.

El costoso cálculo computacional que consumía la formulación rigurosa del problema apremió a Civanlar et al. [17] a proponer una formulación basada solamente en heurísticas. A pesar de lo prometedor del método propuesto por Civanlar et al., la mayoría de los algoritmos de reconfiguración hasta la fecha hacen uso de una mezcla de optimización y técnicas heurísticas.

2.1.1 El algoritmo de Merlin y Back (1975)

Merlin y Back modelaron el sistema de distribución por una estructura de árboles. Las líneas del sistema de distribución fueron representadas por los arcos del gráfico y los buses por los nodos.

El algoritmo inicial de Merlin y Back sólo tuvo en cuenta la contribución de la componente real de la corriente en el cálculo de las pérdidas y dio por supuesto que la diferencia de los argumentos o desfases de las tensiones de los nudos fuesen insignificantes. Merlin y Back aproximaron el comportamiento del sistema de distribución realizando el cálculo del flujo de potencia en corriente continua (DC power flow). La potencia de este algoritmo es que la solución óptima se obtiene independiente del estado inicial de los interruptores de la red, asumiendo la red totalmente equilibrada.

El algoritmo de Merlin y Back consiste en un proceso iterativo, en el que se resuelve un problema de flujo de potencia óptimo (OPF), obteniendo los flujos de potencia por las líneas que hacen que las pérdidas en la red sean mínimas. Una vez realizado el OPF, se utiliza como heurística la apertura de la rama por la que circula el mínimo flujo de potencia. Este proceso continúa hasta que se obtiene una red radial.

2.1.2 El algoritmo de Shirmohammadi y Hong (1989)

El método propuesto por Shirmohammadi y Hong [59] es una modificación del planteado por Merlin y Back.

En primer lugar, resuelve la red mallada realizando el cálculo del flujo de potencia en corriente alterna (AC power flow). Una vez resuelta la red, modela las cargas como fuentes de corriente a partir de las cargas y el valor de tensión obtenida en cada nudo.

En segundo lugar, considera a los interruptores ‘switches’ como fuentes dependientes de corriente con valor ajustable, es decir, deja las corrientes por estas ramas como variables del problema. Estas corrientes corresponderán con las ramas que pertenezcan a un bucle, de lo contrario sería imposible ajustarlas.

Teniendo como variables las corrientes ajustables, se resuelve un OPF al que se denomina ‘optimal flow pattern’ planteando las ecuaciones nodales a cada uno de los nudos con carga, con función objetivo a minimizar; las pérdidas de la red.

Una vez obtenido los valores de las corrientes ajustables con mínimas pérdidas, se elige la rama ‘switch’ con menor intensidad como la rama a abrir. De esta forma se intenta asegurar que se abre la rama que menos perturba a la red (base de la heurística).

Una vez eliminada una rama, se vuelve a plantear el problema de forma iterativa hasta

convertir la red mallada en una red radial.

Los pasos del algoritmo son los siguientes:

1. Resuelve la red (la primera vez la red mallada).
2. Modela las cargas por fuentes de corriente: $I_{BUS} = (S_{BUS}/U_{BUS})^*$
3. Resuelve el optimal flow pattern planteando:
 - a) La primera ley de Kirchhoff a todos los nudos menos al slack: $A \cdot I_{RAMA} = I_{BUS}$, donde A es la matriz de incidencia nudos-ramas.
 - b) La segunda ley de Kirchhoff a todos los lazos de la red considerando sólo la parte resistiva de las impedancias de ramas. La solución es la solución del problema de optimización que minimiza las pérdidas sujeto a $A \cdot I_{RAMA} = I_{BUS}$.
4. Se elige como rama a abrir, aquélla donde la corriente de rama es mínima, siempre y cuando dicha rama pertenezca a un lazo o bucle. Se vuelve al paso 1 a volver a calcular la red hasta que ésta sea radial.

Para la resolución de la red en el paso 1 se utiliza un método aproximado para la resolución del cálculo de flujo de potencias.

Numerosos investigadores apoyan el uso de una mezcla de reglas heurísticas y técnicas de optimización. La mezcla de los dos tipos de técnicas permite que el problema guarde un cierto grado de exactitud, al asegurar convergencia y un tiempo lo suficientemente bueno de solución.

2.1.3 Liu et al. (1989)

Liu et al. [44] ofrecieron un par de algoritmos que afirmaron que asegurarían una solución óptima global. Plantearon que este tipo de algoritmo podría ser de gran ayuda a la hora de la operación y planificación de los sistemas de distribución.

Consideraron las cargas como fuentes de corriente, bien concentradas o distribuidas, y plantearon el problema sobre la base de los siguientes conceptos.

Zona: línea (rama) entre dos buses (nudos de la red).

Nudo: unión de tres o más zonas (ramas).

Arco: conjunto de ramas entre dos nudos.

Consideraron la corriente que circula a través de los arcos como la suma de una corriente básica (y_k) más una constante (a_k). De esta forma se tiene un perfil de carga a través del arco mediante una función continua y monótona decreciente. De esta forma el problema de reconfiguración se transforma en un problema de optimización cuadrático, asegurando con ello una solución óptima global. La función objetivo se linealiza por una función a trozos.

El planteamiento del problema sería:

$$\min \frac{1}{2} \sum_{k=1}^{na} \int_0^{l_k} r_k(x) [y_k(x) - a_k(x)]^2 dx \quad (7)$$

Sujeto a

$$\sum_{m \in B1_i} (y_{m,\max} - a_m) + \sum_{m \in B2_i} a_m = 0, \quad i = 1, 2, \dots, nn \quad (8)$$

Donde $B1_i$ es un conjunto de arcos cuyos perfiles básicos de corriente tienen el valor más elevado en el nodo i , y $B2_i$ es un conjunto de arcos cuyos perfiles básicos de corriente tienen el valor más pequeño en el nodo i , y na y nn son los números totales de arcos y nodos, respectivamente.

Liu et al. plantearon dos algoritmos, uno basado en un modelo de cargas uniformemente distribuidas y otro, donde se podría usar tanto el modelo de cargas distribuidas como el de cargas concentradas.

El primer algoritmo permitió identificar puntos de la red que deberían de estar abiertos para obtener una configuración de mínimas pérdidas, sin embargo no se obtenía el óptimo global cuando se planteaban las restricciones de caídas de tensión.

El segundo algoritmo determinaba las posiciones reales de los interruptores a abrir para obtener la configuración óptima. En este algoritmo se evaluaban las pérdidas al eliminar las zonas (ramas) vecinas al punto de ruptura obtenido del primer algoritmo para cada par de alimentadores. Aunque se obtenían resultados prometedores la identificación de la carga y la estimación de las pérdidas requerían un elevado tiempo de cómputo.

2.1.4 Glamocanin (1990)

Glamocanin [22] formuló el problema de reconfiguración como un problema de trasbordo con costos cuadráticos. Inicialmente se parte de una solución óptima obtenida al plantear el problema con un modelo lineal de las pérdidas. A partir de la solución inicial se va mejorando la solución usando el método del simplex cuadrático.

Este algoritmo es deficiente en cuanto a encontrar la solución óptima, debido a las limitaciones del simplex cuadrático al obtener un mínimo local.

2.1.5 Huddleston et al. (1990)

Desarrolla un algoritmo adecuado para la operación en tiempo real, donde se utiliza la técnica de intercambio de ramas (múltiples pares de alimentadores), partiendo de una red radial.

La principal aportación es el modelado de las pérdidas de la red por una función cuadrática de pérdidas con restricciones lineales [32]. En el método se propone la reducción de ramas del circuito para localizar las cargas y así disminuir la complejidad del análisis. Supone además un factor de potencia para las cargas cercano a la unidad.

2.1.6 Chian y Jean Jumeau (1990)

Chian y Jean Jumeau [15] plantean la solución del problema de reconfiguración de redes como un problema multi-objetivo minimizando las pérdidas y minimizando el desequilibrio de las redes. Para la formulación del problema se ayuda del método de optimización multi-objetivo basado en restricciones (ϵ -constrained) y como método de optimización simple (un solo objetivo) usa la técnica del recocido simulado (simulated annealing).

Se propone una metodología basada en dos etapas.

1. Encontrar un punto no inferior y global para el problema multi-objetivo usando una modificación de la técnica del recocido simulado. La modificación de la técnica del recocido consiste en coordinar el mecanismo de perturbación y el criterio de aceptación de forma conjunta en cada iteración.
2. Aplicar la técnica del recocido simulado para el problema mono-objetivo, resultante de aplicar el método de las restricciones (ϵ -constrained).

En su segundo artículo [14] (el primero publicado), Chian y Jean Jumeau presenta el algoritmo utilizado para el recocido simulado así como dos métodos para resolver el flujo de potencia en redes radiales.

Aunque matemáticamente riguroso, este algoritmo consume una gran cantidad de tiempo, siendo poco práctico.

2.1.7 Wagner et al. (1991)

Wagner et al. [68] presentaron un algoritmo de reconfiguración basado en la solución de un problema lineal del transporte donde las pérdidas fueron aproximadas por una función lineal a trozos. Para un sistema pequeño, como el presentado en dicho artículo, la convergencia se obtuvo de una manera eficiente. Para redes mayores (mayor de 1000 nudos), usando cualquiera de los métodos descritos en su publicación, resultaba desde el punto de vista computacional ineficiente para la implementación en tiempo real.

2.1.8 Goswami y Basu (1992)

Goswami y Basu [27] fueron del convencimiento de que fue inapropiado abordar la red de distribución inicialmente mallada y luego ir abriendo interruptores hasta finalizar en una red radial (métodos descritos por las referencias [49] y [59]). Goswami y Basu introdujeron un algoritmo parecido al de Merlin y Back [49], difiriendo en que la red de distribución nunca se representase como un sistema mallado. En el método propuesto por Goswami y Basu, cualquier cierre de un interruptor es complementado con la apertura de otro interruptor para asegurar una red radial.

El algoritmo propuesto empieza con la red radial (se parte de un árbol determinado) y se cierra una sola rama formando un solo bucle. De entre las posibilidades de las ramas a cerrar se proponen varias alternativas; cerrar el interruptor con mayor diferencia de tensión entre sus nudos, el de menor diferencia de tensión y por último de forma arbitraria (se llega

a la misma solución). Una vez cerrado el interruptor se tiene la red con una sola malla. Se resuelve un OPF (optimal flow pattern) y se decide abrir la rama por la que la corriente es menor. A diferencia de Shirmohammadi y Hong [59], el optimal flow pattern se realiza a un solo lazo o bucle y no a toda la red.

Los pasos del algoritmo son:

1. Se parte de una configuración radial.
2. Se cierra una de las ramas abiertas según:
 - a) Máxima diferencia de tensión.
 - b) Mínima diferencia de tensión.
 - c) De forma arbitraria.
3. Se resuelve la red y se modelan las cargas por fuentes de corriente: $I_{BUS} = (S_{BUS}/U_{BUS})^*$
4. Resuelve el optimal flow pattern planteando:
 - a) La primera ley de Kirchhoff a todos los nudos menos al slack: $A \cdot I_{RAMA} = I_{BUS}$, donde A es la matriz de incidencia nudos-ramas.
 - b) La segunda ley de Kirchhoff a todos los lazos de la red considerando sólo la parte resistiva de las impedancias de ramas. La solución es la solución del problema de optimización que minimiza las pérdidas sujeto a: $A \cdot I_{RAMA} = I_{BUS}$.
5. Se elige como rama a abrir, aquella donde la corriente de rama es mínima, siempre y cuando dicha rama pertenezca a un lazo. Se vuelve al paso 1. Se finaliza si la rama obtenida para abrir es la misma que se cerró en el paso 2.

2.1.9 Borozaan et al. (1995)

Borozaan et al. [6] plantearon el mismo algoritmo que Shirmohammadi y Hong [59], con la diferencia que introducen un algoritmo para el cálculo de la matriz impedancia de lazos reordenando los nudos de la red radial según su profundidad. Con ello consigue una mejora en la eficiencia de cálculo de la solución óptima.

2.1.10 Sarfi et al. (1996)

Sarfi et al. [56] ofrecieron un método para vencer las limitaciones de tamaño impuestas por las técnicas publicadas. A través del uso de técnicas de partición de la red, la red de distribución se subdivide en subsistemas que pueden ser solucionados de una manera más eficiente al ser de menor tamaño. También se consigue una reducción en el número de combinaciones posibles.

2.1.11 Wang et al. (1996)

Wang et al. [69] plantean el problema de la reconfiguración como un problema de optimización multi-objetivo, no diferenciable, combinatorio y con restricciones mediante

pesos en la función objetivo.

El algoritmo parte de una lista de interruptores sobre los que se actúa. Para cada interruptor de la lista, se procede a cerrarlo formándose un bucle. A continuación se resuelve el problema de optimización para buscar el interruptor a abrir del bucle formado, que minimice la función objetivo y que pertenezca a la lista de interruptores operables.

2.1.12 Roytelman et al. (1996)

Roytelman et al. [54] plantean el problema de la reconfiguración mediante un problema de optimización multi-objetivo, que son: minimizar las pérdidas, minimizar el desequilibrio de la red, minimizar la caída de tensión, minimizar la frecuencia de interrupción del servicio y el servicio equilibrado de clientes importantes.

La resolución del problema se plantea en dos etapas; en la primera se intenta conseguir una solución sub-óptima resolviendo la red mallada y eliminando las ramas que posean menor flujo de potencia, y en la segunda, mediante un proceso iterativo plantean un problema de optimización multi-objetivo haciendo uso del método de los pesos.

2.1.13 Ramos et al. (2005)

Proponen un nuevo método basado en caminos [52]. Para cada nudo de la red seleccionan todos los caminos posibles hacia el nudo generador. Enumerados los caminos, se asigna una variable binaria por cada camino y se formula la función objetivo y las restricciones en función de dichas variables binarias. Se hace uso de un umbral basado en la longitud de los caminos para reducir el espacio de búsqueda.

La función de pérdidas es linealizada por una función a trozos. Para resolver el problema una vez formulado se proponen dos métodos de optimización: programación lineal entera-mixta y algoritmos genéticos. Por último, validan estos algoritmos con varias redes de prueba obteniendo las mismas soluciones óptimas que otros autores.

2.1.14 Schmidt et al. (2005)

En este artículo [58] se plantea el problema de optimización utilizando como variables las corrientes por las ramas, y se resuelve mediante el método de Newton (segunda derivada). En cada etapa de búsqueda de las variables enteras (apertura o cierre de los interruptores), se hace uso de la búsqueda de primero el mejor.

Aunque la búsqueda de primero el mejor no garantiza el óptimo global, la calidad de la solución sub-óptima junto con la velocidad del algoritmo, hacen que este enfoque sea bastante interesante.

La estructura del algoritmo es análoga a la propuesta por Merlin y Back [49]. Inicialmente la red se encuentra con todos los interruptores cerrados (red mallada). Mediante un procedimiento por etapas, se abre uno de los interruptores en cada etapa. Se parte inicialmente de una lista de interruptores candidatos a abrir.

En cada etapa, se calculan las corrientes por las ramas de forma que se minimicen las

pérdidas totales en la red tal como se encuentre en ese momento. Para ello, el problema de minimización con restricciones (ecuaciones de la red) se convierte en un problema de optimización sin restricciones multi-objetivo mediante el método de penalización exterior. Por tanto, la función objetivo a minimizar tendrá dos términos: las pérdidas de la red y las ecuaciones eléctricas de la red, multiplicadas por dos pesos (peso de pérdidas y peso de penalización). Para resolver el problema de optimización se utiliza el método de Newton con la segunda derivada.

El criterio, una vez resuelto el problema de optimización, para seleccionar el interruptor a abrir es precisamente el menor incremento de pérdidas que el interruptor a abrir produzca.

Para el cálculo de las pérdidas se proponen dos métodos: el primero es una estimación de las pérdidas para la apertura de cada uno de los interruptores de la lista sobre la base de la aproximación cuadrática de la función de pérdidas en torno a las corrientes obtenidas en el problema de optimización; el segundo, calcula las pérdidas realizando un cálculo de flujo de potencia pero sólo a los n interruptores con menores pérdidas obtenidos en el primer método de estimación de pérdidas. El primer método es mucho más rápido pero impreciso, y el segundo es preciso pero más lento necesitando de que se realice el primero.

También se tienen en cuenta en este método las restricciones de capacidad por las líneas incluyendo un nuevo término en la función objetivo.

Los resultados de este método son bastantes prometedores, ahora bien, hay que decir, que sólo tiene en cuenta un conjunto pequeño de interruptores a abrir, y que necesita el ajuste experimental de los pesos de la función objetivo.

2.1.15 Gomes et al (2006)

En este artículo [26] los autores presentan un algoritmo en el que introducen un flujo de cargas óptimo para reducir el número de flujos de potencia a realizar. La heurística se basa en dos estrategias: a) se utilizan variables continuas para representar la apertura o cierre de los interruptores y b) el cálculo del flujo de potencia se utiliza para obtener las pérdidas de la red.

El esquema del método es el siguiente:

1. Crear una lista (Lista 1) de n interruptores
2. Realizar un flujo de potencias óptimo y seleccionar un conjunto de interruptores que posean su valor más próximo a cero (cero indica abierto y uno cerrado). Crear una lista (Lista 2) con los m interruptores seleccionados.
3. Abrir el interruptor i de la Lista 1.
4. Calcular las pérdidas mediante un flujo de potencia si la solución es factible y la red no está aislada. Si no, cerrar el interruptor i , hacer $i=i+1$ y volver al paso 2 hasta que $i=m$.
5. Actualizar la lista ordenándola por pérdidas y cerrar el interruptor i .

6. Si no se han chequeado todos los interruptores de la Lista 2, hacer $i=i+1$ y volver al paso 2 hasta que $i=m$.
7. Se decide abrir definitivamente el interruptor k que produce el incremento de pérdidas menor en el sistema.
8. Si la Lista 2 no está vacía, actualizarla e ir al paso 2. Si está vacía, se finaliza el algoritmo.

2.2 Técnicas heurísticas

Con el objeto de reducir el espacio de búsqueda y también para reducir el tiempo de computación que se necesita para resolver un problema de optimización, surgen un conjunto de algoritmos que se basan exclusivamente en reglas heurísticas. Este conjunto de métodos alcanzan generalmente una solución cercana a la óptima global en un tiempo razonable sobre todo en redes de gran tamaño. Las reglas heurísticas emanan del conocimiento del sistema donde se aplican aproximaciones sobre el modelo del mismo.

2.2.1 El algoritmo de Civanlar et al. (1988)

Muy diferente del algoritmo de Merlin y Back [49], Civanlar et al. [17] hicieron uso de técnicas puramente heurísticas para determinar una configuración del sistema de distribución que reduciría las pérdidas. El uso de un algoritmo puramente heurístico se justificó por las dos ventajas que ofreció:

- La definición de dos reglas heurísticas para reducir el número de ramas candidatas a abrir.
- La formulación de una ecuación para determinar la reducción relativa de pérdidas debido a una operación de intercambio de ramas.

Las dos reglas heurísticas de Civanlar et al. se basaron en los requisitos típicos de operación del sistema. Analizando las relaciones de caída de tensión en los nudos, determinaron si una rama en particular aumentaría o disminuiría las pérdidas de sistema.

El uso de estas reglas heurísticas fue particularmente útil a medida que ciertas ramas podrían descartarse sin realizar cálculos. Las dos reglas heurísticas presentadas en este algoritmo son definidas como sigue.

Regla 1. La reducción de pérdidas sólo puede ser lograda si hay una significativa caída de tensión a través de un interruptor abierto del lazo.

Regla 2. Se conseguirá una reducción de pérdidas si las cargas en el camino de mayor caída de tensión al alimentador son transferidas hacia el camino de menor caída de tensión al alimentador.

Una vez se aplicaban las dos reglas heurísticas, la reducción de pérdidas relativa ofrecida por el resto de las opciones podría ser determinada usando la fórmula (9).

$$\Delta P = \operatorname{Re} \left[2 \left(\sum_{i \in D} I_i \right) (E_m - E_n^*) \right] + R_{loop} \left| \sum_{i \in D} I_i \right|^2 \quad (9)$$

Donde:

- D El conjunto de nudos que se desconectan del alimentador (II) y se conectan al (I).
- m Nudo del alimentador (I) al que se conectarán las cargas del alimentador (II) .
- n Nudo del alimentador (II) que se conectará al nudo m del alimentador (I).
- I_i Corriente (carga) del nudo i .
- R_{loop} Resistencia en serie del bucle que se forma al unir la rama entre los dos alimentadores
- E_m Componente de $E = R_{BUS} \cdot I_{BUS}$ correspondiente al nudo m . R_{BUS} es la matriz de resistencia de nudos del alimentador (I) antes de que se transfiera la carga. R_{BUS} se obtiene tomando el nudo de la subestación como referencia. I_{BUS} es el vector de las corrientes de nudo.
- E_n Se obtiene igual que E_m pero definida para el alimentador (II).

Los pasos del algoritmo son los siguientes:

1. Se parte de una red radial
2. Se resuelve la red radial y para cada rama abierta:
 - a) Se anotan las opciones de conmutación formadas por los pares {rama abierta, rama(k)}
 - b) Siendo rama(k) el conjunto de ramas desde el nudo de menor tensión de la rama abierta hasta el nudo raíz o alimentador.
3. Se calcula la reducción de pérdidas según la fórmula propuesta para cada opción de conmutación (intercambio de ramas). Se elige la opción de conmutación que provoque menores pérdidas.
4. Si la solución obtenida es mejor que la inicial se vuelve al paso 1, si no, se da por finalizado

Las ventajas de los algoritmos de Civanlar et al. fueron entre otras:

- La determinación rápida de una configuración que redujo pérdidas.
- El número reducido de combinaciones debido a las reglas heurísticas.
- El uso de una fórmula empírica para estimar la reducción relativa de las pérdidas.
- La aproximación razonable para el cálculo del flujo de potencia.
- No depende del orden de las ramas abiertas de la red radial, dado que analiza todas las opciones de conmutación para una red radial dada.

En cuanto a las desventajas:

- Sólo se considera un par de operaciones de intercambio de ramas a la vez.
- El método aseguró sólo una reducción de las pérdidas, y no una minimización.
- Depende del estado inicial de la red, es decir, de la red inicial.
- El número de ramas candidatas es elevado para redes grandes.
- Mediante la fórmula propuesta para estimar las pérdidas se evita realizar repartos de carga, sin embargo, es necesario realizar otros cálculos para encontrar el conjunto de nudos D , agrupar cargas y calcular R_{loop} .

Después de los esfuerzos de Civanlar et al., han sido propuestos varios algoritmos, los cuales hacen uso solamente de técnicas heurísticas. Estos algoritmos heurísticos intentan ofrecer mejores soluciones o hacer uso de fórmulas más sofisticadas de estimación de las pérdidas.

2.2.2 Baran y Wu (1989)

Baran y Wu [5] trataron de mejorar el método de Civanlar et al. introduciendo dos fórmulas de aproximación para el cálculo del flujo de potencia en redes radiales. Las ecuaciones del flujo de potencia usadas por Baran y Wu estaban definidas por la aproximación recursiva de P , Q y U en cada nudo. A través del uso de este método de cálculo, las restricciones de caída de tensión y sobrecarga de las líneas se verificarían en el algoritmo mismo y no sólo después de que se alcanzase una nueva configuración.

Baran y Wu trataron de vencer las limitaciones del intercambio de ramas con una estrategia de búsqueda que sólo consideraba un subconjunto de los árboles posibles, ya que fácilmente la solución finalizaría en un mínimo local. Dependiendo de una configuración inicial factible, se asumió que el sistema de distribución se encontraba dividido en niveles. En cada nivel se seleccionaba la opción que no violaba las restricciones y que minimizaba la función objetivo. Un factor crucial que motivó a Baran y Wu a utilizar un procedimiento puramente heurístico fue que el problema del árbol mínimo es combinatorio por naturaleza.

En general, el método propuesto en este artículo sigue el enfoque propuesto por Civanlar et al., introduciendo dos nuevos métodos para resolver el flujo de carga para redes radiales.

2.2.3 Taylor y Lubkeman (1990)

Taylor y Lubkeman [65] plantearon como objetivo primario de su trabajo evitar sobrecargas en los transformadores, sobrecargas en los alimentadores (feeders) y tensiones anormales. Afirmaron que satisfaciendo estos criterios de forma simultánea se llegaría a una minimización de las pérdidas.

Taylor y Lubkeman enfocan el problema como un árbol de decisión para representar las operaciones de conmutación de las ramas, siendo ésta su principal contribución. Utilizan una estrategia de búsqueda basada en heurística de primero el mejor (best-first) donde plantean cinco conjuntos de reglas diferentes para decidir dentro del espacio de búsqueda.

Después de cada decisión, se realiza un flujo de potencia para actualizar el estado operativo de la red.

2.2.4 Castro y Watanabe (1990)

Castro y Watanabe [9] prolongaron el trabajo de Civanlar et al. haciendo uso de una estrategia de búsqueda más extensa. Un rasgo crucial del algoritmo de Civanlar et al. es que en el árbol de búsqueda se expande la opción de conmutación más prometedora, lo cual disminuye el tiempo de solución, pero aumenta la probabilidad de obtener un mínimo local. Castro y Watanabe decidieron no descartar ciertas combinaciones, seleccionando un número máximo de opciones las cuales fueran factibles en cada etapa del algoritmo y también tuvieron en cuenta el orden en el que se realizaban las conmutaciones.

La técnica modificada de búsqueda propuesta por Castro y Watanabe aumenta la probabilidad de obtener una mejor solución para el problema de reconfiguración. Los inconvenientes de la técnica propuesta por Castro y Watanabe incluyen el hecho de que aún así no se asegura un óptimo global.

2.2.5 Jasmon y Callistus (1991)

Jasmon y Callistus [33] proponen una modificación del método de Baran y Wu [5] con el objeto de simplificar y acelerar la búsqueda de la configuración de mínimas pérdidas. Hacen uso del método de resolución de redes radiales (distflow) propuesto por Baran y Wu.

Para cada rama abierta, se identifica el bucle y se busca la rama a intercambiar con la que actualmente se encuentra abierta. Para ello, calcula cuál debe ser el flujo de potencia que debe circular por alguna de las ramas del bucle de forma que la reducción de pérdidas sea óptima. Este flujo óptimo (P_m), es improbable que coincida con el flujo de potencia de alguna de las ramas del bucle por lo que se eligen las dos ramas entre las que se encuentra dicho flujo óptimo. De entre las dos candidatas al final se elige la que provoque una mayor reducción de pérdidas.

El cálculo de la expresión del flujo óptimo se deriva de las ecuaciones del método ‘distflow’ y se basan en la suposición de que el flujo de potencia activa por una rama es mucho mayor que el flujo de reactiva.

La ecuación (10) corresponde con la expresión del flujo de potencia óptimo.

$$P_m = \frac{\sum r_l P_l - \sum r_r P_r}{r_{loop}} \quad (10)$$

Donde:

- r_r, r_l Cada una de las resistencias óhmicas de las ramas desde la rama abierta al nudo del alimentador del lado derecho e izquierdo, respectivamente.
- P_r, P_l Flujos de potencia de las ramas desde la rama abierta al nudo del alimentador del lado derecho e izquierdo, respectivamente.
- r_{loop} Resistencia suma de las ramas que forman el bucle.

Hay que decir que esta suposición no es siempre cierta, y además en los bucles donde no se cumple la suposición, son precisamente los más conflictivos a la hora de decidirse.

También se aporta en este artículo la elección de un orden de comienzo en cuanto a los bucles, indicando que primero se debe comenzar con los bucles internos, es decir, los bucles que no contengan a otro o parte de otro bucle en su interior. Otra aportación es la posibilidad en ciertos casos de realizar más de un intercambio de ramas de forma simultánea.

Los pasos del algoritmo son los siguientes:

1. Se identifica el bucle de cada rama abierta de la red radial de partida.
2. Se calculan las pérdidas para la rama nominal del bucle (la rama nominal es la rama adyacente a la rama abierta en lado de menor tensión). Si se logra una reducción de pérdidas, se continúa con el paso 3, si no, se vuelve al paso 1 a evaluar el siguiente bucle y si no hay más bucles se finaliza el algoritmo.
3. Se obtiene el flujo de potencia óptimo.
4. Se busca el flujo de potencia de las ramas del lazo, y se localiza la rama que tenga el flujo igual al flujo óptimo. Lo más probable es que se encuentre entre dos ramas, eligiéndose la rama que provoque mayor reducción de pérdidas. Si no existe dicha rama se elige la rama adyacente.
5. Se vuelve al paso 1 para evaluar el siguiente bucle. Si no hay más bucles se finaliza el algoritmo.

2.2.6 Lee et al. (1994)

Lee et al. [41] proponen una búsqueda en profundidad partiendo de una red radial. Se define un índice de desempeño como función de los flujos de potencia por las líneas de alimentación (feeders) y su resistencia óhmica. Este índice permite determinar el mejor candidato de entre las alternativas posibles para reducir las pérdidas. El orden de expansión del árbol de búsqueda en profundidad se realiza mediante una función de evaluación. Dado que el algoritmo propuesto sólo ataca un interruptor en cada paso, puede ocurrir que al elegir un interruptor al principio según el índice de desempeño propuesto, el interruptor elegido no pertenezca a la solución óptima.

La definición del índice de desempeño propuesto para elegir el mejor candidato corresponde a la ecuación (11), mientras que la función de evaluación para ordenar los candidatos es la propuesta en la ecuación (15).

$$\min PI_x = \min_{x \in \{L\}} \sum_{l=1}^n W_l \frac{P_l^2 + Q_l^2}{(S_{l,base})^2} X_l \quad (11)$$

Sujeto a:

$$\sqrt{P_l^2 + Q_l^2} \leq S_{l,base} \quad (12)$$

X_i es 1 ó 0 dependiendo de como se encuentre el interruptor (13)

Estructura radial de los alimentadores (14)

Donde:

$\{L\}$ Conjunto de soluciones factibles

P_i, Q_i Flujos de potencia activa y reactiva en la sección de línea i

W_i Factor de peso determinado por la resistencia de la sección de línea i

Función de evaluación:

$$\sqrt{\Delta U^2 + \Delta \theta^2} \quad (15)$$

Donde:

$\Delta U, \Delta \theta$ Diferencias de tensión y argumento en el interruptor i

Según se ha comentado anteriormente, para evitar soluciones sub-óptimas el proceso del algoritmo descrito se hace iterativo. Los pasos del algoritmo son:

1. Se parte de una red radial y se calcula el índice de desempeño: PI^0 .
2. Se calcula la función de evaluación para cada interruptor abierto, eligiendo el interruptor con mayor función de evaluación.
3. Se expande el árbol de búsqueda para el interruptor seleccionado, es decir, se buscan los interruptores candidatos a intercambiarse con el seleccionado y se calcula para cada interruptor candidato su índice de desempeño.
4. Se elige el interruptor con menor índice de desempeño: PI_{min} .
5. Si $(PI_{min} < PI^0)$ entonces el interruptor se selecciona como abierto y $(PI^0 = PI_{min})$. Si $(PI_{min} \geq PI^0)$ entonces el interruptor no se cambia.
6. Convergencia: Si $(|PI^k - PI^{k+1}| < \epsilon)$ se finaliza, si no se vuelve al paso 2.

2.2.7 Augugliaro et al. (1995)

Augugliaro et al. [4] proponen un algoritmo compuesto por varias etapas heurísticas para resolver el problema de reconfiguración de redes y lo aplican a las redes de estudio hasta la fecha publicada en la literatura técnica.

Las etapas y pasos del algoritmo en cada etapa son los siguientes:

Etapas 1. Algoritmo heurístico de reconfiguración.

- Partiendo de la red mallada, realiza un cálculo de flujos de potencia en alterna y va abriendo en cada paso la rama con menor flujo de potencia hasta llegar a una red radial base.

Etapas 2a. Algoritmo de intercambio de ramas. Recursivo.

- Partiendo de la solución radial base de la etapa anterior, se comienza cerrando las ramas en el mismo orden que se abrió en el algoritmo anterior. Para cada rama que se cierra, se realiza un cálculo de flujo de potencia y se abre la rama del bucle creado que posea menor flujo de potencia. Si en alguno de los pasos la solución difiere de la solución base, toma esta nueva solución como la solución base e inicia el proceso nuevamente. El algoritmo acaba cuando la solución obtenida coincida con la base.

Etapas 2b. Algoritmo de intercambio de ramas(). Transferencia de carga*

1. Parte de la solución obtenida en el algoritmo recursivo.
2. Para cada rama j abierta de la solución.
 - a) Se calcula la diferencia de tensión entre los nudos de la rama j .
 - b) Se cierra la rama j .
 - c) Para cada rama i a partir del nudo de más tensión hasta el nudo alimentador del bucle.
 - Se abre la rama i .
 - Se calcula el incremento de pérdidas: ΔP_i .
 - Se cierra la rama i .
 - d) Se abre la rama j .
3. Si alguna de las ramas i intercambiadas ha reducido las pérdidas ΔP_i , se cierra la rama j y se abre la que ha producido menores pérdidas (rama i), volviéndose a iniciar la etapa 2b de nuevo.

(*) Este algoritmo deriva del algoritmo de Civanlar et al. [17].

2.2.8 Broadwater et al. (1996)

Broadwater et al. [8] plantean un método heurístico basado en la programación óptima denominada de ascenso discreto.

Por simplicidad, las cargas se modelan por fuentes de corrientes y el algoritmo se aplica a redes de corriente continua. El algoritmo evoluciona alimentando las cargas a través de los alimentadores (feeders) de forma gradual. Es decir, en cada paso del algoritmo se va incrementando la carga a suministrar por los alimentadores y las cargas conectadas a los alimentadores van conectándose en cada paso en función de su carga.

Los pasos del algoritmo del ascenso discreto son:

1. Se convierten las cargas a fuentes de corriente. Se calcula el incremento del ascenso de carga (ΔI) como el 20% de la suma de las corrientes de todas las cargas.
2. $I = I + \Delta I$.

3. Se conecta cada alimentador con la carga más próxima que aún no esté totalmente alimentada. Al principio será una carga por cada alimentador.
4. Para cada alimentador i , se calculan las pérdidas en las líneas imponiendo que la suma de las corrientes que aportan los alimentadores sea igual a I . Se añade el ΔI a uno de los alimentadores y al resto, cero, de forma alternativa. Para n alimentadores se tendrán n combinaciones.
5. Se elige la combinación de menores pérdidas. Se actualiza la corriente que aporta cada alimentador.
6. Se comprueba si la carga final conectada a cada alimentador son servidas. Una carga final es servida si la corriente del alimentador, tras restarle las cargas que se encuentren conectadas entre el alimentador y la carga final es mayor o igual que la corriente de la carga final. En el caso que esté servida, se añade la siguiente carga conectada al alimentador. De esta forma va creciendo la red radial hasta alimentar a todas las cargas.
7. Si quedan cargas por alimentar se vuelve al paso 2.
8. Las ramas abiertas serán aquéllas por las que no circule corriente.
9. Al terminar el algoritmo es evidente que podrán existir cargas que son servidas por varios alimentadores. Se identifican dichas cargas y se anotan como cargas no servidas, es decir, nudos finales. ($I_o = \text{suma de corrientes de cargas servidas}$).
10. Para cada carga j no servida
 - a) Para cada alimentador i , se calculan las pérdidas de las líneas conectando la carga j al alimentador i .
 - b) La combinación del alimentador que produzca menores pérdidas alimentará a la carga.

El algoritmo se puede aplicar a incrementos de potencia en vez de corrientes, necesitando mayor complejidad de cálculo. Para el caso de aplicación a corriente alterna, se realiza el cálculo de la potencia activa y reactiva por separado, eligiéndose el incremento que provoca menos pérdidas, sea el de activa o el de reactiva.

2.2.9 Fan et al (1996)

En este artículo [21] se plantea un método heurístico denominado optimización de un bucle simple (single loop optimization).

En este método se modelan las cargas por fuentes de corriente. Partiendo de una red radial se cierra un interruptor formándose un bucle. Para cada bucle se calcula el incremento de pérdidas que se obtendría al intercambiar un par de ramas en el bucle, eligiéndose como rama a abrir la que produce una mayor reducción de pérdidas mediante la fórmula propuesta (16), donde se calcula el incremento de pérdidas que se produce al abrir una rama en el bucle entre los nudos j y $j+1$. Para un determinado lazo, se prueba en primer

lugar con uno de los caminos desde la rama abierta hasta el nudo raíz del lazo. Si la rama elegida no produce una disminución de pérdidas se elige la primera rama del camino alternativo. Si no se encuentra una rama con menores pérdidas dicho lazo se considera optimizado.

Este proceso se hace iterativo sobre todos los bucles hasta que no se encuentra una mejora en los mismos. Como rama a cerrar para formar el bucle se elige la rama con mayor diferencia de tensión.

$$\Delta P = \sum_{i=1}^n R_i \Delta I^2 + 2 \cdot \operatorname{Re} \left\{ \sum_{i=1}^n R_i I_i \Delta I^* \right\} \quad (16)$$

Donde :

$\Delta I = -I_{j+1}$ Incremento de corriente de lazo al abrir la rama entre los nudos j y $j+1$.

R_i Resistencia de la rama i del bucle.

I_i Corriente por la rama i del bucle.

2.2.10 Lin y Chin (1998)

Lin y Chin [43] proponen un método heurístico para resolver el problema de minimización de pérdidas. Para ello plantean tres índices, un índice de tensión, un índice óhmico y un índice de decisión que es el producto de los dos anteriores para cada una de las ramas de la red. La definición de estos índices es la siguiente: ecuaciones (17), (18) y (19).

$$\mu_{\tilde{V}}(n) = \exp^{-\omega \frac{(\Delta V_n)^2}{(\Delta V_{av}^2)}} \quad (17)$$

$$\mu_{\tilde{L}}(n) = \exp^{-\omega \frac{R|Y|^2}{R_{av} \cdot Y_{av}^2}} \quad (18)$$

$$\mu_{\tilde{D}}(n) = \mu_{\tilde{V}}(n) \mu_{\tilde{L}}(n) \quad (19)$$

Donde :

ΔV_n Caída de tensión en la rama n .

ΔV_{av}^2 Media geométrica de todas las caídas de tensión de las ramas de un bucle.

R_{av} Resistencia media de las ramas de un bucle.

Y_{av} Admitancia media de las ramas de un bucle.

ω Factor de peso.

A su vez, estos índices llevan asociados un factor de peso (ω), dependiendo de la posición relativa de la rama respecto a la rama que se ha cerrado para formar el bucle. El valor del factor de peso es directamente proporcional a la distancia de la rama en cuestión a la rama que se ha cerrado para formar el bucle e inversamente proporcional al número de ramas que forman el bucle.

El algoritmo comienza con una distribución radial. Se cierran todas las ramas abiertas y se

calcula el índice de decisión de cada rama en función de la solución de la red mallada. La solución será abrir las ramas que posean un índice de decisión mayor siempre y cuando la solución sea factible y no se incumplan las restricciones. Si esto último ocurriera se elige la siguiente rama que posea el índice de decisión mayor.

2.2.11 McDermot et al. (1999)

McDermot et al. [47] proponen un algoritmo heurístico constructivo que empieza con todas los interruptores abiertos, y en cada paso, se cierra el interruptor que resulta en un menor incremento de la función objetivo. La función objetivo se define como el incremento de pérdidas dividido por el incremento de cargas alimentadas. También propone una opción de retroceso para mitigar los efectos de la búsqueda avara (greedy) del algoritmo. Este algoritmo toma más tiempo de computación que otros métodos pero posee la ventaja de ser más preciso.

2.2.12 Kashem et al. (2000)

Kashem et al [38] proponen una búsqueda de árbol mínimo mediante la técnica de intercambio de ramas. Para cada bucle, existen -con la rama abierta- dos caminos desde los nudos de la rama abierta hasta el nudo que alimenta al bucle o lazo. A estos caminos se les denomina '*lado de menor tensión*' al camino de mayor caída de tensión y '*lado de mayor tensión*' al camino que posee menor caída de tensión.

Se denomina rama nominal a la siguiente a la rama abierta en el lado de menor tensión, y se denomina pérdida nominal a la reducción de pérdidas que se tiene en el bucle, al intercambiar la rama abierta por la rama nominal determinándose según la fórmula (20).

Una vez determinado el bucle donde se produce una reducción de pérdidas positiva, mediante la ecuación (20), se utiliza la ecuación (21) para determinar la rama que produce una mayor reducción de pérdidas.

$$\Delta P_{loop} = \sum_{i \in loop} \left[2(P_i - P_{i+1}) + \frac{2x_{i+1}^2 P_{Li+1} - 2r_{i+1}x_{i+1}Q_{Li+1} + r_{i+1}}{r_{i+1}^2 + x_{i+1}^2} - \frac{2x_i^2 P_{Li} - 2r_i x_i Q_{Li} + r_i}{r_i^2 + x_i^2} \right] \quad (20)$$

$$\Delta P_{loss} = 2(P_i - P_{i+1}) + \frac{2x_{i+1}^2 P_{Li+1} - 2r_{i+1}x_{i+1}Q_{Li+1} + r_{i+1}}{r_{i+1}^2 + x_{i+1}^2} - \frac{2x_i^2 P_{Li} - 2r_i x_i Q_{Li} + r_i}{r_i^2 + x_i^2} \quad (21)$$

Donde:

P_i, Q_i	Flujo de potencias activa y reactiva en la rama i
r_i, x_i	Resistencia y reactancia de la rama i
P_{Li}, Q_{Li}	Carga activa y reactiva en el nudo i

Los diferentes pasos del algoritmo son:

1. Se resuelve un flujo de potencias de la red radial para obtener los flujos de potencia en las ramas.

2. Se comprueban las pérdidas nominales para cada bucle según (20) y se seleccionan sólo los bucles con pérdidas nominales positivas.
3. Se calcula la reducción de pérdidas según (21) para todas las ramas en el lado de menor tensión del bucle y se selecciona la rama que produce una mayor reducción de pérdidas.
4. Se genera una lista con las opciones de intercambio de las ramas computadas en el paso 3 en orden descendente.
5. Se comprueba que se cumplen las restricciones de la red.
6. Si se satisfacen las restricciones ir al paso 8, en otro caso ir al paso 7.
7. Si hay otra opción de conmutación en el lado de menor tensión del bucle, seleccionarla e ir al paso 6. En otro caso finalizar.
8. Se selecciona la opción como el intercambio de ramas y se recalcula el flujo de cargas de esta opción para el siguiente nivel de búsqueda.
9. Repetir los pasos del 1 al 8 hasta que no existan más lazos en la red con pérdidas nominales positivas.

2.2.13 Kashem et al. (2001)

En este artículo [39] se plantea un enfoque geométrico para la minimización de pérdidas. En este método, cada lazo en la red es representado por un círculo, el cual se obtiene de la relación entre el incremento de pérdidas debido al intercambio de rama y los flujos de potencia en las ramas. Si no hay incremento de pérdida en el sistema, entonces todos los círculos se tocan (son tangentes entre sí) en el origen de coordenadas y los círculos sin cambio de pérdidas son denominados círculos con incremento de pérdidas nulos.

El bucle de la red con mayor reducción de pérdidas se identifica comparando el radio de todos los círculos con incremento de pérdidas nulo. El lazo correspondiente al círculo más grande con incremento de pérdidas nulo da como resultado la reducción de pérdidas máxima en la red.

Luego, se analizan los posibles intercambios de rama en el lazo de máxima reducción de pérdidas comparando el tamaño del círculo para cada intercambio de rama.

Si las pérdidas de potencia se reducen debido a un intercambio de rama, entonces el tamaño del círculo disminuye y por lo tanto el círculo menor da como resultado la reducción de pérdidas máxima y la rama correspondiente se considera como la mejor candidata para la reducción de pérdidas máxima.

La técnica propuesta se ha probado en la red de 69 nudos de Baran y Wu [5], obteniéndose una disminución en el tiempo de computación respecto al método propuesto en dicha referencia.

2.2.14 Gohokar et al (2003)

En este artículo [24] se plantea la misma técnica heurística que plantean Fan et al. [21], es decir, optimización de un simple bucle (single loop optimization). La aportación de Gohokar et al. es un planteamiento topológico del problema donde se obtienen fácilmente los lazos de la red mediante álgebra de matrices.

2.2.15 Gomes et al. (2005)

Presentan [25] un método heurístico para resolver el problema de reconfiguración para minimizar las pérdidas. El algoritmo usa una estrategia heurística comenzando con la red mallada. A partir de una lista de interruptores sobre los que se puede actuar, la elección del interruptor a abrir se obtiene calculando las pérdidas de todas las configuraciones resultantes de abrir cada interruptor.

Un esquema del método se presenta a continuación con los algoritmos para los dos procedimientos heurísticos.

Procedimiento A

1. Se parte de una lista de ramas que pueden ser maniobradas. En total n ramas.
2. Partiendo de la red mallada se abre una rama i . Se comprueba si la red no está aislada y se resuelve la red. Si la red está aislada se cierra la rama y se comienza de nuevo el paso 2 con la siguiente rama $i+1$.
3. Se cierra la rama i . Se vuelve al paso 2 a probar la siguiente rama hasta que se comprueben todas las ramas de la lista.
4. Una vez comprobados todas las ramas de la lista, se busca la rama que ha producido menores pérdidas, dejando esta rama abierta definitivamente y guardando las ramas vecinas (adyacentes) del mismo lazo que han provocado menores pérdidas.
5. Se actualiza la lista de ramas que pueden ser maniobradas y se vuelve al paso 2 con $i=1$, hasta que la lista de ramas operables esté vacía.
6. El proceso continúa hasta que el número de ramas abiertas coincide con el número de eslabones.

Procedimiento B

1. Se parte de la red radial solución del procedimiento A.
2. Para cada uno de los interruptores abiertos, se intercambia el interruptor con cada uno de sus vecinos, se calculan las pérdidas de la red y se comprueba que la red es factible y no se encuentra aislada. Si las pérdidas son menores se procede al intercambio de interruptores.

2.2.16 Raju y Bijwe (2008)

Raju y Bijwe [53] presentan un método de dos etapas para la minimización de pérdidas. La

eficiencia del método deriva del uso de un coeficiente de sensibilidad de potencia activa con respecto a las impedancias de las ramas. En la primera etapa usa las sensibilidades partiendo de la red mallada hasta alcanzar una red radial. En la segunda etapa utiliza un intercambio de ramas para afinar la solución. El algoritmo es efectivo en cuanto al número de repartos de carga que realiza, pero como contrapartida debe de chequear si la red es conexa al seleccionar la rama y también debe de calcular las sensibilidades para cada iteración.

2.3 Técnicas basadas en inteligencia artificial

La popularidad de la inteligencia artificial (IA) y la disponibilidad comercial de paquetes de software para la implementación de las mismas, ha dado lugar a una plétora de aplicaciones basadas en inteligencia artificial para resolver el problema de reconfiguración de redes. Las redes neuronales artificiales, la computación evolutiva, la inteligencia colectiva y los sistemas expertos se han usado para implementar el procedimiento de reconfiguración de sistemas de distribución.

Aunque el uso de métodos basados en inteligencia artificial ha resultado ser valioso en una variedad extensa de aplicaciones, la cautela es que no ofrecen la mejor solución en cada implementación. El uso de la IA, sin duda, figurará como una técnica eficiente a medida de que se dispongan de métodos más sofisticados.

2.3.1 Redes neuronales en optimización combinatoria

Las redes neuronales artificiales son modelos muy simplificados de las redes neuronales biológicas. En el campo de la optimización combinatoria los modelos de redes más utilizados son los de Boltzman, Hopfield y Kohonen.

Kim et al. (1993)

Kim et al. [40] propusieron un algoritmo de dos etapas basado en redes neuronales para el problema de reconfiguración de redes. Para evitar las dificultades asociadas con el entrenamiento de grandes conjuntos de datos, se propuso que la red de distribución se dividiera en zonas de carga. Cada zona de carga contendría un conjunto distinto de dos redes neuronales entrenadas para clasificar el nivel de carga y para reconfigurar, basada en la asignación del nivel de carga. El uso de una red neuronal en esta aplicación ofreció una solución rápida sin tener que resolver el flujo de potencia.

Se usó una topología de red multicapa de retropropagación en vista de la capacidad de aprendizaje adaptativa de esta estructura. Los datos de entrenamiento se obtuvieron de la solución del problema mediante programación cuadrática.

Aunque se obtuvieron resultados muy respetables, la precisión de la solución obtenida dependía de los pares de entrenamiento.

Hsu et al. (1995)

Hsu et al [29] utilizan una red neuronal de retropropagación. Crean el conjunto de datos de entrenamiento a partir de la curva de carga diaria para cada alimentador tras resolver el

flujo de potencia de la red. Las variables de las redes neuronales son determinadas tras un análisis de sensibilidad del factor de potencia de los alimentadores, longitud de los conductores y capacidad de los transformadores.

Kashem et al. (1998)

Kashem et al. [37] utilizan redes neuronales artificiales para resolver el problema de reconfiguración de redes. En este artículo proponen un conjunto de datos de entrenamiento obtenidos a partir de cargas P-Q constantes y variando las diferentes opciones de reconfiguración de la red. La estructura de la red se basa en el perceptrón multicapa y el algoritmo de entrenamiento utilizado es el de retropropagación. El algoritmo propuesto se ha comparado con el de Kim et al. (1993) [40].

Salazar et al. (2006)

Este artículo [55] propone un algoritmo basado en redes neuronales. Se utilizan técnicas de clasificación para determinar el mejor conjunto de entrenamiento para una red neuronal.

2.3.2 Computación evolutiva

La computación evolutiva nace en el año 1993 y retoma conceptos de la evolución y la genética para resolver principalmente problemas de optimización. Esta rama de la inteligencia artificial tiene sus raíces en tres desarrollos relacionados pero independientes entre sí:

- Algoritmos genéticos.
- Programación evolutiva.
- Estrategias evolutivas.

La característica de la computación evolutiva en general hace que esta técnica sea particularmente adecuada para los problemas de optimización. Basada en los mecánicos de selección natural y genética natural, combina el proceso evolucionista con la optimización funcional. La información discreta cifrada de series artificiales usada por la computación evolutiva se presta a sí mismo de forma favorable para el estado binario de los interruptores en el problema de reconfiguración de los sistemas de distribución. Un rasgo interesante de la computación evolutiva es que busca en una población de puntos y no de un punto en particular de búsqueda, a fin de que, en la población se encuentre la posibilidad de obtener una solución óptima muy rápidamente.

Los algoritmos genéticos fueron desarrollados por John H. Holland en la década de 1960 y su motivación inicial fue la de proponer un modelo general de proceso adaptable.

La programación evolutiva fue creada en la década de 1960 y su creador fue L. J. Fogel. Este desarrollo comenzó como un esfuerzo encaminado a crear inteligencia artificial, basándose en la evolución de máquinas de estado finitas.

Las estrategias evolutivas fueron propuestas por Ingo Rechenberg y Hans-Paul Schwefel en

la década de 1970. Su principal objetivo era el de resolver problemas de optimización de parámetros.

De manera general la computación evolutiva toma como base las ideas de la evolución propuestas por Charles Darwin y en los descubrimientos realizados por Gregor Mendel en el campo de la genética.

Song et al. (1997)

Song et al. [61] adoptan una nueva técnica de búsqueda evolutiva. Para mejorar el comportamiento de la programación evolutiva se propone una programación evolutiva controlada por lógica difusa. La mutación se realiza de forma adaptativa durante el proceso de evolución. La longitud de la cadena que identifica los parámetros es mucho más corta que las propuestas por otros autores. Se utiliza una búsqueda combinada en profundidad y anchura para acelerar la optimización. Las restricciones de igualdad y desigualdad se incluyen en la función objetivo mediante pesos de penalización.

Lin et al. (2000)

Lin et al. [42] utilizan un algoritmo genético refinado para el problema de reconfiguración de redes con el objeto de minimizar las pérdidas. El problema se optimiza mediante una búsqueda estocástica.

La población inicial se determina abriendo los interruptores con menor corriente en cada bucle a partir de un cálculo de flujo de potencias óptimo (OPF), con todos los interruptores cerrados (red mallada). La solución del OPF es sub-óptima, aunque en algunos casos puede ser la óptima, por lo que se podría obtener la solución de forma prematura. Para evitarlo, el esquema de cruce y mutación se refina mediante un mecanismo de competición. Con el objeto de acelerar la computación los mecanismos de cruce y mutación se combinan en uno solo.

En el proceso de búsqueda se emplean listas Tabú con reglas heurísticas para mejorar el comportamiento. Este nuevo enfoque provee de un conjunto de decisiones en vez de aplicar un patrón fijo que tiende a converger en un óptimo local

Zhu (2002)

En este artículo [71] se propone un método mejorado basado en un algoritmo genético refinado. Se presenta un método de cálculo de flujo de potencia para redes radiales. Las mejoras que se realizan en el algoritmo genético corresponden a un codificado del cromosoma, la función objetivo y el patrón de mutación. De esta manera se evita la convergencia prematura del algoritmo.

Huang (2002)

Huang [31] propone un algoritmo genético mejorado basado en lógica difusa multi-objetivo para resolver el problema de reconfiguración en una red radial.

Su y Lee (2003)

La evolución diferencial es una de los mejores algoritmos evolutivos. Consiste en un método simple basado en búsquedas estocásticas, en el que los parámetros de la función se codifican como variables en coma flotante. Este método ha sido verificado como bastante prometedor para resolver problemas de optimización con variables reales. Sin embargo, es bastante probable que se alcance un óptimo local o bien converja prematuramente. Este inconveniente se solventa empleando una gran población, requiriendo un tiempo de computación elevado.

Su y Lee proponen [64] una versión híbrida de este algoritmo, para evitar la necesidad de emplear una población grande. La versión híbrida implanta dos operaciones adicionales: la fase de aceleración y la migración. La operación de migración permite al algoritmo híbrido mejorar la exploración del espacio de búsqueda y aumenta la probabilidad de éxito de una búsqueda global.

Venkatesh y Ranjan. (2003)

En este artículo [67] se propone el uso de la programación evolutiva adaptativa mediante lógica difusa como técnica de solución. Esta técnica se elige por su adecuada particularidad para resolver problemas de optimización con un espacio de solución discontinuo y donde se desea un óptimo global. La adaptación mediante lógica difusa se utiliza para tener en consideración la optimización multi-objetivo.

Venkatesh et al. (2004)

En este artículo [66] los autores hacen uso de la misma técnica del artículo del mismo autor, Venkatesh y Ranjan. (2003) [67], donde aparte de los criterios de optimización utilizados se añade la maximización de la carga de la red. Para ello se utiliza un índice de carga difuso.

Delbem et al (2005)

Varios algoritmos evolutivos se han propuesto para resolver el problema de reconfiguración de redes, sin embargo el elevado tiempo de computación es muy alto y por tanto prohibitivo en redes grandes. Este aspecto limita su aplicación en tiempo real.

El comportamiento de los algoritmos evolutivos para el problema de reconfiguración de redes se ve altamente afectado por la representación de árbol computacional que se adopte. El empleo de una representación por codificación de cromosomas y los correspondientes operadores es de vital importancia para el comportamiento del algoritmo. Una eficiente estructura de datos para la representación del árbol puede mejorar significativamente el comportamiento del algoritmo evolutivo.

Delbem et al [20] proponen una codificación del árbol y dos operadores genéticos para mejorar el comportamiento del algoritmo aplicado al problema de reconfiguración de redes.

Prasad et al. (2005)

En este artículo [51] los autores presentan un nuevo método basado en algoritmos genéticos con mutación mediante lógica difusa. El algoritmo propuesto supera la naturaleza combinatoria del problema y lo trata con funciones multi-objetivos discontinuas.

Las características más atractivas del algoritmo son: mantiene la radialidad de la red alimentando a todos los nudos mediante un esquema de codificación elegante y una eficiente convergencia debida a una mutación controlada mediante lógica difusa.

Chiou et al. (2005)

Presentan [16] un algoritmo híbrido de evolución diferencial con un escalado variable para minimizar las pérdidas y mejorar el perfil de tensiones.

El factor de escalado variable se basa en una regla de éxito 1 a 5 para evitar los problemas de factores de escalado fijos o aleatorios y con el objeto de aliviar la selección del operador de mutación, típico de los algoritmos híbridos de evolución diferencial. El método se ha comparado con el algoritmo híbrido de evolución diferencial, con algoritmos genéticos y con la técnica del recocido simulado, siendo el algoritmo propuesto por los autores mejor a los otros.

2.3.3 Inteligencia colectiva (colonia de hormigas)**Su et al. (2005)**

En este artículo [63] se propone resolver el problema de reconfiguración de redes minimizando las pérdidas mediante el algoritmo de la colonia de hormigas. Este algoritmo está inspirado en el comportamiento natural de las colonias de hormigas.

El método se ha comparado con la técnica del recocido simulado y con algoritmos genéticos, en dos redes de estudio presentando las mismas soluciones pero más eficiente en tiempo.

2.3.4 Sistemas expertos**Chang et al. (1990)**

Chang et al. [10] introdujeron los requisitos para un paquete de software basado en el conocimiento, para análisis y el control de sistemas de distribución. La base de conocimiento utilizaría herramientas específicas para asegurar un modelado preciso y representativo. La reconfiguración para la reducción de pérdidas figura destacadamente en su paquete propuesto y sería impulsada por un sistema experto.

Jung et al. (1993)

Jung et al. [36] desarrollan un sistema experto para resolver el problema de la sobrecarga de los alimentadores sujeto a restricciones de capacidad y caídas de tensión. Para reducir el espacio de búsqueda se utiliza un sistema experto basado en reglas heurísticas, donde se

utiliza la técnica de búsqueda de primero el mejor (best-first).

Das (2006)

En este artículo [19] se plantea un enfoque del problema con una función multi-objetivo expresada mediante lógica difusa y un conjunto de reglas heurísticas. Los múltiples objetivos evaluados son: minimizar el desequilibrio de los alimentadores, minimizar las pérdidas, minimizar la desviación de tensiones en los nudos y las restricciones de capacidades de las líneas.

Estos cuatro objetivos se modelan con un conjunto de conjuntos borrosos. Las reglas heurísticas se incorporan en el algoritmo para minimizar el número de operaciones de apertura y cierre de los interruptores. En realidad plantea la solución mediante un sistema experto aplicando reglas heurísticas apoyadas mediante lógica difusa.

2.4 Otras técnicas

Dentro de este apartado se han incluido algunas técnicas específicas y que no encajan en las divisiones anteriores. Entre ellas se encuentran:

- Recocido simulado (simulated annealing)
- Búsqueda TABU
- Programación matemática (optimización pura)

2.4.1 Técnica del recocido simulado

Los algoritmos de búsqueda local normalmente iteran partiendo de una solución aleatoria, generando un vecino que sea mejor hasta que se llegue a una solución que no tiene mejores vecinos.

El recocido simulado se basa en aceptar en forma limitada transiciones que no mejoran la función de costo usando un mecanismo no determinista. El recocido simulado se llama así por su analogía con el proceso físico de recocido de sólidos, en el cual, se incrementa la temperatura de un sólido cristalino a una temperatura alta, y luego se decrementa la temperatura muy lentamente hasta alcanzar un estado base de mínima energía, con una estructura cristalina lo más regular posible.

Chang y Kuo (1994)

Chang y Kuo [11] utilizan la técnica del recocido simulado para el problema de reconfiguración planteándose una función multi-objetivo que minimice las pérdidas y obtenga la solución óptima de reconfiguración en un mínimo número de intercambio de ramas. Para ello reduce el problema multi-objetivo en uno simple mediante el método de los coeficientes de peso asignando un factor de penalización (peso) al número de intercambio de ramas. Para el cálculo de las pérdidas de las redes radiales utiliza una aproximación lineal de las pérdidas despreciando los términos cuadráticos.

Los pasos del algoritmo son los siguientes:

1. Inicialización ($i = 0$): Se establece la temperatura inicial T_0 y una red radial inicial de partida (A). Se calcula la función objetivo; el coste: $C(A)$.
2. Perturbación: Se obtiene una nueva red radial aplicando un modelo de perturbación a la red A .
 - a) Se cierra una rama aleatoriamente de A .
 - b) Se abre de forma aleatoria las ramas vecinas a la abierta.
 - c) Se calcula la función objetivo $C(A')$.
3. Criterio de aceptación: Se calcula el incremento de costes: $\Delta C = C(A') - C(A)$.
 - a) $\text{casos_procesados} = \text{casos_procesados} + 1$.
 - b) Si $\Delta C < 0$: $A = A'$. $\text{caso_aceptado} = \text{caso_aceptado} + 1$.
 - c) Si $\Delta C > 0$: Se calcula un número aleatorio entre 0 y 1. $R \in [0,1]$.
 - Si $\exp(-\Delta C / T_i) > R$: $A = A'$. $\text{caso_aceptado} = \text{caso_aceptado} + 1$
 - Si NO: $A = A$
4. Criterio de equilibrio: $\text{razón de aceptación} = n^\circ_casos_aceptados / n^\circ_casos_procesados$. Si $\text{razón_aceptación} < 0.1$ ir al paso 5, si NO volver al paso 2
5. Enfriamiento: $T_{i+1} = \alpha(T_i) \cdot T_i$, donde $\alpha(T_i) \in [0,1]$.
6. Convergencia: Si tras varias iteraciones sucesivas la temperatura no cambia se considera que el proceso se ha congelado y la configuración obtenida es la óptima o cercana a la óptima. En caso contrario volver al paso 2.

Dan Jiang y Baldick (1996)

Dan Jiang y Baldick [18] proponen un algoritmo de reconfiguración y control de batería de condensadores. Se utiliza la técnica del recocido simulado para el problema de reconfiguración y un algoritmo de optimización discreta para el control de la batería de condensadores óptima.

Jeon et al. (2002)

En este artículo [34] se usa un algoritmo del recocido simulado mediante una operación de intercambio de ramas de forma automática. La técnica del recocido simulado es muy apropiada para problemas combinatorios de optimización grandes, ya que puede evitar mínimos locales aceptando mejoras en la función de coste. Sin embargo, requiere un esquema significativo de enfriamiento y una estrategia especial. Jeon et al. aumentan la función objetivo con las condiciones de operación del sistema de distribución y usan un esquema de enfriamiento polinómico respecto al tiempo, el cual se obtiene

estadísticamente durante el proceso de búsqueda.

Jeon y Kim (2004)

En este artículo [35] se presenta la misma técnica que en el artículo [34]. La modificación respecto al anterior consiste en utilizar la búsqueda Tabú. La búsqueda Tabú intenta determinar una mejor solución al igual que el algoritmo del descenso máximo, pero no puede garantizar la convergencia. Es por ello que se utiliza un híbrido de estos dos métodos con algunas adaptaciones para mejorar el tiempo de computación de tiempo y la convergencia.

2.4.2 Búsqueda Tabú

La búsqueda Tabú es una estrategia para resolver problemas de optimización combinatoria. Combina la búsqueda local con una heurística para evitar caer en mínimos locales y evitar entrar en ciclos. La idea básica de la búsqueda tabú es continuar con una búsqueda local cuando se llega a un mínimo local al permitir movimientos que no mejoran la solución.

Para evitar regresar a soluciones pasadas y entrar en ciclos, usa una memoria temporal, llamada lista tabú, que guarda la historia reciente de la búsqueda. En resumen, la búsqueda tabú es una combinación de búsqueda local con un mecanismo de memoria a corto plazo.

Los elementos claves en búsqueda Tabú:

- Restricciones Tabú: restringir la búsqueda al clasificar ciertos movimientos como prohibidos (tabú), para evitar caer en soluciones recientemente generadas.
- Criterio de aspiración (aspiration criteria): liberar la búsqueda por medio de una función de memoria a corto plazo (olvido estratégico).

Cherkaoui et al. (1993)

Cherkaoui et al. [13] hizo uso de la estrategia de búsqueda tabú para resolver el problema de reconfiguración mediante intercambio de ramas. Esta formulación del problema de reconfiguración incluye la presencia de transformadores de distribución, las restricciones de seguridad de las líneas, pero no tiene en cuenta el desequilibrio del sistema.

El método de búsqueda de tabú es una técnica popular de solución en problemas combinatorios de optimización. Aunque el uso de la búsqueda tabú usado para la red experimental propuesta por Cherkaoui et al. producía unos tiempos muy elevados para alcanzar la solución, la naturaleza de su problema de optimización del 0-1 hacía que el problema fuera aún más difícil para sistemas reales de gran tamaño con restricciones añadidas del sistema.

Zhang et al (2006)

Este artículo [70] presenta un algoritmo basado en una búsqueda tabú mejorada. La búsqueda tabú es un algoritmo eficiente de búsqueda meta-heurística. Posee la ventaja tanto del método de búsqueda local por ascenso de la colina (hill-climbing) como los métodos de

búsqueda globales basados en algoritmos inteligentes.

Pero la longitud de codificación y el candidato vecino son dos de los parámetros cruciales que hacen malo el comportamiento de la búsqueda tabú, y además, estos dos parámetros son difíciles de determinar por adelantado.

La operación de mutación, operador principal en los algoritmos genéticos, se introduce para debilitar la dependencia de la búsqueda tabú con la longitud.

Además, la vecindad del candidato de los posibles en cada bucle, se diseña para mejorar la eficiencia de la búsqueda local y ahorrar una gran cantidad de tiempo de computación.

2.4.3 Programación no lineal entera-mixta

Sarma y Prakasa Rao (1995)

Sarma y Prakasa Rao [57] proponen un nuevo método de programación no lineal entera-mixta. En su método plantean una variable entera para cada nudo unido a un interruptor abierto. Para un problema de reconfiguración de n mallas, dispone por tanto de $2n$ variables enteras. Plantea las pérdidas como una función no lineal dependiente de las variables enteras, sujeta a n restricciones.

Plantean un método sistemático para obtener las pérdidas en función de las variables binarias para cada uno de los árboles (circuitos) que existen por cada alimentador, siendo la función de pérdidas totales, la suma de las pérdidas en cada circuito.

Al resolver el problema de optimización obtiene la solución óptima de las posibles combinaciones que se puedan dar: 2^n . Repitiendo este proceso hasta que no se produzca reducción en las pérdidas se llega a la solución final.

Ali Abur (1996)

Ali Abur [1] presenta un método de reconfiguración para redes radiales donde el problema se formula y resuelve utilizando una técnica de programación lineal modificada. Las modificaciones son introducidas principalmente para mantener la red radial junto con las restricciones de capacidad de las líneas.

2.5 Clasificación de los algoritmos

Independientemente de la heurística seleccionada para abordar la solución del problema de reconfiguración de redes, existe una variedad de algoritmos encaminados para encontrar la solución. De las técnicas analizadas anteriormente, existe una cierta similitud en cuanto a los algoritmos utilizados, o mejor dicho, se pueden clasificar dichas técnicas dependiendo de la estructura utilizada en el algoritmo.

Los diferentes algoritmos utilizados en las técnicas que hacen uso de heurísticas junto con optimización y las técnicas heurísticas puras, se pueden clasificar *grosso modo* en los siguientes grupos:

- Algoritmos que parten de la red mallada.
- Algoritmos que parten de una red radial.
- Algoritmos híbridos.
- Otros algoritmos.

2.5.1 Algoritmos que parten de la red mallada

Estos algoritmos poseen una estructura general común a todos ellos. Inicialmente se considera la red mallada, es decir, todos los interruptores se encuentran cerrados. El siguiente paso es abrir una rama bajo un criterio determinado. La selección de la rama a abrir, depende de la técnica utilizada:

- En algoritmos que usan reglas heurísticas junto con la optimización de una función se elige como rama a abrir la solución del problema de optimización planteado.
- En algoritmos que usen una heurística, se elige una rama de entre un conjunto de candidatas que cumpla con la heurística diseñada.

La rama seleccionada se queda abierta, volviéndose a buscar una nueva rama a abrir hasta que la red resultante es radial.

Merlin y Back [49] y Shirmohammadi y Hong [59], fueron los primeros en hacer uso de este tipo de algoritmos. Existen variaciones a la estructura general del algoritmo, como variar la heurística en cada iteración, o bien elegir varias soluciones y expandir el árbol de búsqueda, con el objeto de salir de los mínimos locales. Entre otros algoritmos que parten de la red mallada, se encuentran; Borozan et al. [6], Schmid et al. [58] y Gomes et al. [26].

2.5.2 Algoritmos que parten de la red radial

A diferencia de los algoritmos que parten de una red mallada, otra alternativa consiste en partir de una solución o estado de la red que sea radial. Al comenzar con una red radial, la filosofía general consiste en cerrar una rama de forma que se produzca un lazo y a partir de aquí seleccionar una rama del lazo formado como rama a abrir en función de:

- La solución de un problema de optimización planteado a la red de un solo lazo.
- La heurística elegida para el caso de algoritmos que usen como técnica la heurística pura.

La rama seleccionada se queda abierta, volviéndose a tener una red radial. El proceso continua hasta que se cumpla un criterio de paro preestablecido.

La estructura de este algoritmo permite una variedad de los mismos. Los parámetros o características que permiten la variabilidad de estos algoritmos son, entre otros:

- La ordenación de las ramas abiertas, a la hora de seleccionar la rama a formar el único lazo.

- La heurística, propiamente dicha, para seleccionar la rama.
- La selección de un conjunto de candidatas y expandir el árbol de búsqueda.
- La variabilidad del criterio de paro.
- La posibilidad de realizar varias iteraciones al algoritmo completo, alterando alguna de las características anteriores.

Debido a esta propiedad inherente a la estructura del algoritmo, existen muchas variantes encontradas en la literatura técnica. Entre éstos, se encuentran los algoritmos propuestos por Civanlar et al. [17], Baran y Wu [5], Castro y Watanabe [9], Jasmon y Callistus [33], Goswami y Basu [27], Fan et al. [21], Kashem et al. [38] y Gohokar et al. [24].

2.5.3 Algoritmos híbridos

Estos algoritmos utilizan una mezcla de los dos anteriores. Usan en primer lugar un paso o procedimiento partiendo de la red mallada y luego aplican un segundo paso utilizando como partida la red radial solución del primer paso. En general, son algoritmos más lentos pero con una mejor calidad de la solución. Ejemplo de estos algoritmos son los realizados por Augugliaro et al. [4] y Gomes et al. [25].

2.5.4 Otros algoritmos

Por último, respecto a los algoritmos que usan solamente una heurística, existe un tipo de algoritmo donde la obtención de la red radial se realiza mediante una forma constructiva. En general, se forma la red radial solución del problema, construyéndola desde el nudo raíz hasta las cargas en función de una heurística planteada. Los algoritmos de Broadwater et al. [8] y de MacDermot et al. [47] se incluyen dentro de este tipo de algoritmos.

2.6 Consideraciones asociadas a la reconfiguración

El problema de reconfiguración de redes de distribución no está limitado a determinar una configuración de mínimas pérdidas satisfaciendo las restricciones de capacidad de las líneas y limitaciones en las tensiones. Un algoritmo de reconfiguración en tiempo real estaría obligado a considerar otros criterios de operación previamente inexplicados.

Varias áreas que requieren atención son:

- El efecto transitorio de las operaciones de conmutación.
- El nivel de cortocircuito del sistema reconfigurado.
- El efecto de reconfiguración en el servicio al cliente y la fiabilidad del sistema.

La influencia de la operación de reconfiguración en la coordinación de las protecciones es un aspecto importante a ser considerado.

El costo de las pérdidas asociadas con armónicos a causa de la conmutación repetitiva no es de gran preocupación, ya que el proceso de reconfiguración es un procedimiento

transitorio y no permanente. Los interrogantes de la frecuencia de conmutación y el costo de conmutación deben ser analizados para asegurar que la operación de reconfiguración sea efectiva en cuanto al coste.

2.6.1 La coordinación de la protección y la reconfiguración

Hsu y Jwo-Hwu [30] se ocuparon de la planificación de la coordinación de las protecciones mientras resolvían el problema de reconfiguración del sistema de distribución para la minimización de las pérdidas y el desequilibrio de las cargas.

La reconfiguración dinámica del sistema de distribución puede acarrear un cambio en los requisitos de coordinación de las protecciones. Hsu y Jwo-Hwu propusieron que el sistema de distribución debería estar dividido en áreas interconectables. Las áreas interconectables serían diseñadas para asegurar que cualquier operación de conmutación dentro de un área específica no comprometiera la coordinación.

Es evidente que este método está limitado a actuar dentro de cada área. La determinación de las áreas interconectables se obtiene a partir de las planificaciones de reconfiguración obtenidas a corto plazo. Este tipo de procedimiento sería válido para las reconfiguraciones basadas en la demanda pronosticada, pero no sería suficiente para la implementación en tiempo real.

2.6.2 Estableciendo una reconfiguración propuesta

Establecer la reconfiguración de distribución por cualquier razón debe seguir una estrategia metódica para asegurar la interrupción mínima de servicio al cliente, y que la integridad física del equipo no se viole. La secuencia de conmutación debe ser seleccionada de forma que el efecto transitorio sea minimizado y ninguna de las restricciones de capacidad de las líneas se violen. Una estrategia óptima de conmutación debe ser desarrollada con anterioridad para una implementación eficiente.

Aoki et al. [3] presentaron un método para determinar la secuencia ideal de transferencia de carga cuando las configuraciones iniciales y finales de la red se conocieran. Afirmaron que este algoritmo serviría para mantener las cargas equilibradas y minimizar las pérdidas.

El algoritmo realizaría la secuencia de conmutación de forma secuencial de una en una operación de conmutación de la red. Las pruebas de este método propuesto en redes de distribución de tamaño razonable demostraron su eficiencia. Este algoritmo aseguraba que los siguientes criterios específicos de operación no serían comprometidos por la reconfiguración:

- La línea y las capacidades de la corriente del transformador.
- Las restricciones de caída de tensión.
- El número limitado de lazos en un instante dado.

Las estrategias de conmutación desarrolladas por otras aplicaciones de reconfiguración se pueden utilizar en algoritmos de reducción de pérdidas. Las operaciones de reconfiguración

se necesitan para operaciones tan comunes como la restauración del servicio y el aislamiento ante las faltas (Hsu et al. [28] y Singh et al. [60]) así como las tendencias más recientes sobre el equilibrio de las cargas, mejora de la seguridad, y la reconfiguración de emergencia de las cargas según Aoki et al. [2].

2.6.3 La frecuencia de las operaciones de reconfiguración

Para los problemas de reconfiguración de redes de distribución la frecuencia con la que se realizan es un parámetro a tener en cuenta. Si la frecuencia de conmutación es demasiado alta, la duración de los costosos elementos mecánicos de los interruptores se acorta de forma considerable, mientras que si no se realiza con la suficiente frecuencia, entonces no se alcanzan los máximos ahorros.

Broadwater et al. [7] propusieron un algoritmo de reconfiguración capaz de determinar patrones de conmutación en función del tiempo. El método propuesto por Broadwater et al. fue lo suficientemente versátil como para hacer uso de datos disponibles del sistema, estadísticas de carga, y/o estimaciones de carga. El algoritmo propuesto en [46] por Markushevich et al. obtiene una estimación de la carga respecto a un patrón predeterminado de conmutación.

Chen y Cho [12] realizaron un análisis de un esquema de reconfiguración para cada hora. Estudiaron los patrones de carga de cada hora de una red determinada sobre un intervalo de un año para definir las condiciones de carga de cada hora para cada subestación. Para cada condición de carga horaria, determinaron la reconfiguración de mínimas pérdidas usando un procedimiento *branch and bound*. El algoritmo de Chen y Cho también identificaba los interruptores críticos de la red, manualmente se manejaron interruptores que podrían ser manipulados para obtener configuraciones estacionales óptimas.

Utilizaron como función objetivo el costo de la operación actual de reconfiguración. El costo de las operaciones de conmutación se resolvió asignando un número máximo de operaciones anuales y una duración de la vida media del interruptor especificada por el fabricante.

López et al. [45] compararon tres escenarios para las pérdidas en redes de distribución con demanda variable. En el primer escenario la reconfiguración de la red se realiza cada hora para adaptarse a los cambios del perfil de carga. En los otros dos escenarios, la red permanece fija, uno escenario donde se minimiza la red para el perfil de carga o demanda pico y otro escenario para un perfil de demanda media. Confirmaron en su estudio que el escenario que posee la mayor reducción de pérdidas corresponde con el de una hora, pero concluyeron que las topologías de demanda pico y media son preferibles pues evitan un excesivo número de operaciones de conmutación.

Capítulo 3

TÉCNICA HEURÍSTICA BASADA EN NUDOS DE RUPTURA

El análisis de los diferentes enfoques utilizados para resolver el problema de reconfiguración realizado en el capítulo anterior permite conocer y clasificar las soluciones a dicho problema.

Hasta la fecha no se ha encontrado un método que obtenga la solución óptima global en un tiempo razonable para redes de gran tamaño, dada la elevada combinatoria del problema en cuestión.

Las técnicas basadas en inteligencia artificial (redes neuronales, computación evolutiva y sistemas expertos) alcanzan soluciones óptimas, incluso la óptima global aunque poseen la desventaja de necesitar un elevado tiempo computacional o bien necesitan de un entrenamiento o ajuste de un conjunto de parámetros específicos propios de la red eléctrica bajo estudio. Igualmente ocurre con otras técnicas como el recocido simulado y la búsqueda tabú.

Respecto a los algoritmos de optimización puros, es decir, sin tener en cuenta ningún tipo de heurísticas, éstos sólo son viables para un conjunto reducido de las operaciones de conmutación de las redes o bien para redes pequeñas, necesitando de un tiempo elevado de computación para redes grandes en las que cualquier línea de la red se puede conmutar.

Las técnicas que presentan un mejor comportamiento (tiempo de computación y optimalidad) para resolver el problema de reconfiguración de redes corresponden con aquéllas que utilizan alguna heurística que encamina la búsqueda mediante la reducción del espacio de búsqueda.

La gran mayoría de artículos encontrados en la literatura técnica aplican técnicas con heurísticas o bien técnicas donde combinan optimización frente a heurísticas.

Estas técnicas llegan a soluciones sub-óptimas, incluso a las óptimas globales en tiempos razonablemente cortos. En general, las técnicas heurísticas puras son más eficientes computacionalmente que las que utilizan optimización, dado que en cada iteración deben

La configuración de la Figura 2 no es posible físicamente, aunque es la configuración radial que provoca mínimas pérdidas. Teniendo en cuenta que sólo hay una carga en el lazo que es alimentada por dos alimentadores, y dado que no se puede dividir el nudo tal como se ha hecho en la Figura 2, parece intuitivo que el nudo k debe ser el nudo final de uno de los dos alimentadores. De esta manera, los sentidos de los flujos de potencia en la red mallada y en la red radial coinciden. Por tanto, al abrir el lazo, el nudo k tendrá que estar alimentado por uno de los dos alimentadores. Para ello, las dos opciones posibles son las dos ramas adyacentes al nudo de ruptura.

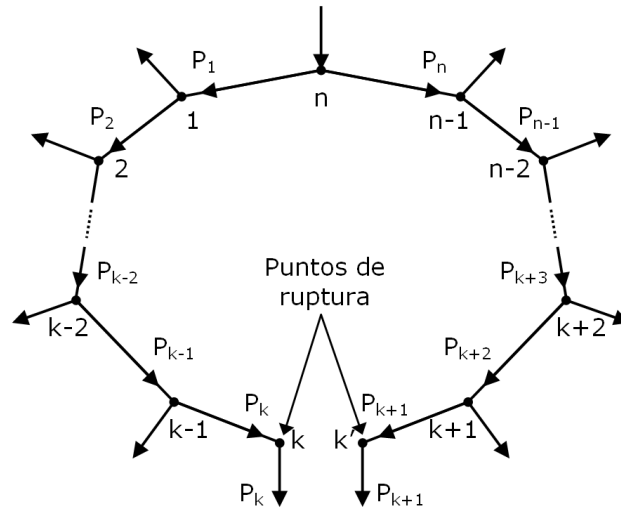


Figura 2 Grafo dirigido de la red radial equivalente de una red DC de un solo lazo

Para la generalización del problema a una red de corriente alterna con un solo lazo, se tendrán en cuenta las consideraciones expuestas para la red de corriente continua. La principal diferencia con respecto a una red DC es que en la red AC se tienen dos flujos de potencia por las ramas: la potencia activa y la potencia reactiva. Para tratar este inconveniente, los flujos de potencia de una red AC se representan mediante dos grafos dirigidos, uno para el flujo de potencia activa y otro para el flujo de potencia reactiva, como se muestra en la Figura 3.

Se puede apreciar que aparecen dos nudos de ruptura: un nudo de ruptura para la potencia activa y otro para la potencia reactiva. Por analogía con el problema de corriente continua, habría que considerar como ramas candidatas las ramas con flujos de potencia entrante en los nudos de ruptura. Sin embargo, en el problema de alterna, al no tener por qué coincidir los nudos de ruptura P y Q , la elección de las ramas candidatas en principio no son evidentes.

Ocurre además, que aunque coincidan los nudos de ruptura P y Q , tampoco se asegura que las ramas entrantes en dichos nudos sean las ramas candidatas a abrir para obtener la red radial de mínimas pérdidas. A continuación se desarrollará el problema de continua así como el problema de alterna donde se pondrá de manifiesto el inconveniente que plantea el problema de alterna.

Como se ha comentado anteriormente, en el problema de corriente continua, el nudo de ruptura posee la propiedad de que es el nudo donde confluyen los flujos de potencia y al mismo tiempo es el nudo de mínima tensión. Además, en corriente continua la red radial de mínimas pérdidas es aquella que se obtiene al abrir el lazo por la rama de la red mallada que circula menor corriente en valor absoluto.

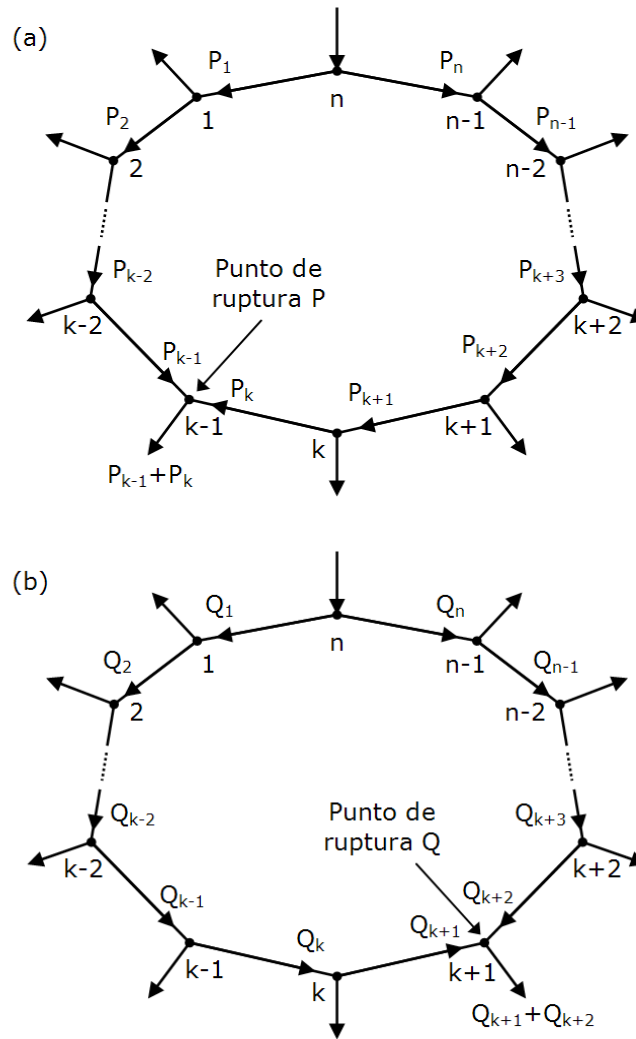


Figura 3 Grafo dirigido de una red AC. (a) potencia activa y (b) potencia reactiva

Sea una red de corriente continua formada por un único lazo donde las cargas se han modelado por fuentes de corrientes. Al abrir una rama cualquiera del lazo nos encontramos con una red radial. Existirán tantas posibilidades de redes radiales como ramas posea el lazo. La red radial resultante, aplicando el teorema de compensación, se puede descomponer como suma de dos redes; la red mallada más una red donde se han eliminado todas las excitaciones, y por la que circula precisamente el incremento de corriente producido en la rama elegida a abrir. El incremento de corriente es precisamente la corriente que circula por la rama de la red mallada abierta, cambiada de signo.

En la Figura 4 se muestra la red radial (a) al abrir la rama k como suma de la red mallada (b)

y la red mallada tras aplicar el teorema de compensación. (c)

Por superposición, las corrientes por las ramas de la red radial se pueden expresar según (22), y las pérdidas de cada una de las redes radiales según (23).

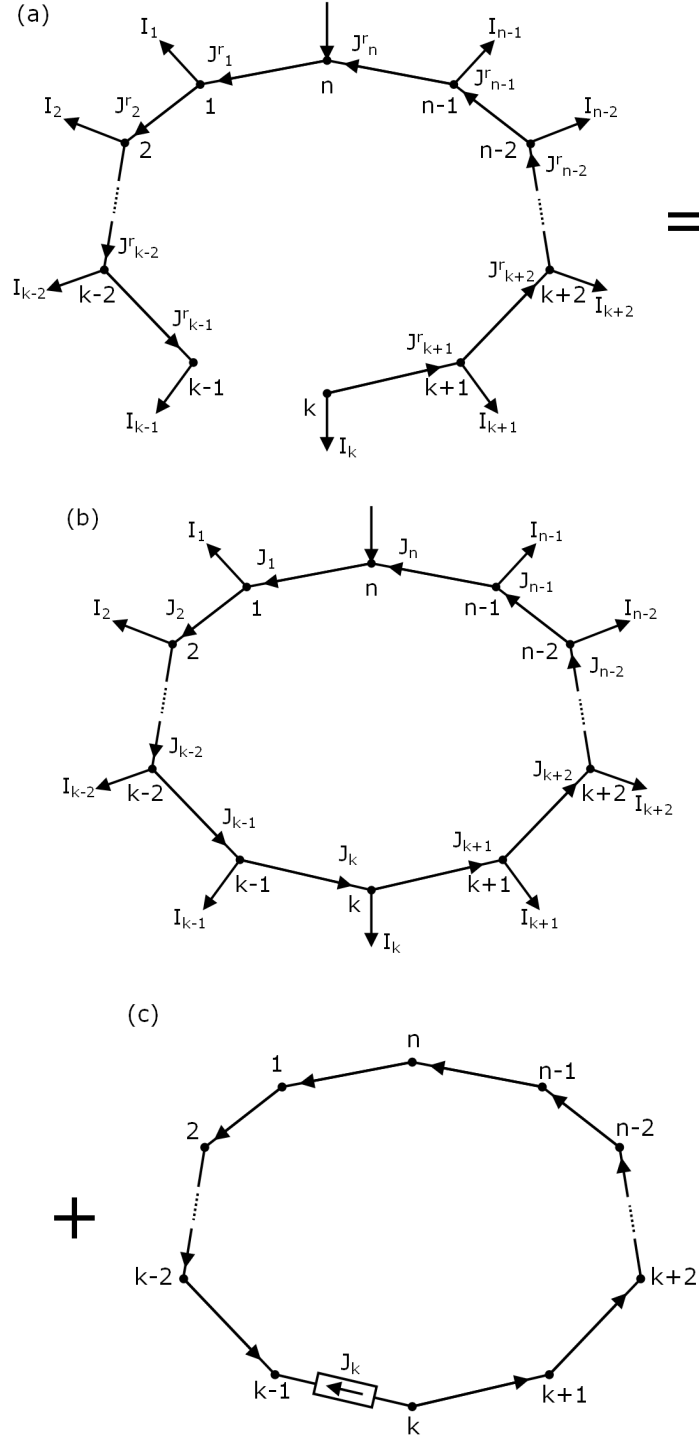


Figura 4 Corrientes por la red radial. (a) red radial, (b) red mallada y (c) red compensada

$$[J^r] = [J] + [\Delta J] = [J] - [J_k] \quad (22)$$

$$P(k) = \sum_{i=1}^n R_i (J_i - J_k)^2 \quad (23)$$

Donde:

- $[J^r]$ Vector columna de las corrientes de rama de la red radial
- $[J]$ Vector columna de las corrientes de rama de la red mallada
- $[J_k]$ Vector columna formado por la corriente de la rama k de la red mallada en todas sus filas (el incremento es constante para todas las ramas dado que existe un solo lazo)

Desarrollando la diferencia de pérdidas entre dos redes radiales m y k , y teniendo en cuenta que la suma de tensiones del lazo es cero, se alcanza la expresión (24).

$$\begin{aligned} \Delta P &= P(m) - P(k) = \sum_{i=1}^n R_i (J_i - J_m)^2 - \sum_{i=1}^n R_i (J_i - J_k)^2 \\ &= \sum_{i=1}^n R_i (J_m^2 - J_k^2) + 2 \sum_{i=1}^n R_i J_i (J_k - J_m) = \sum_{i=1}^n R_i (J_m^2 - J_k^2) \end{aligned} \quad (24)$$

De la expresión (24) se deduce que la red radial k será la red radial de mínimas pérdidas si la corriente por la rama k es menor que la corriente por la rama m para cualquier rama m de la red mallada. En otras palabras, la red radial de mínimas pérdidas de la red mallada formada por un solo lazo, se formará abriendo la rama por la que circula menor corriente.

El análisis anterior permite resolver la red radial de mínimas pérdidas para una red DC compuesta por un solo lazo. Generalizando para l lazos, en una red se tienen tantos lazos como eslabones o enlaces posea la red. Al abrir los enlaces de cada uno de los lazos se obtiene una red radial. Al aplicar compensación a la red radial resultante, se obtiene que ésta es suma de dos redes, la red mallada más una red donde se han eliminado las excitaciones (las cargas modeladas por corrientes y la tensión del nudo raíz) y donde los eslabones se han sustituido por los incrementos de corriente (las corrientes de los eslabones de la red mallada).

El vector incremento de corriente de la red compensada será el producto de la matriz de conexión ramas-lazos básicos por las corrientes de dichos lazos básicos, que no son otras que las corrientes por dichos eslabones en la red mallada. Por tanto, las corrientes por las ramas de la red radial se obtienen mediante la ecuación (25).

$$[J^r] = [J] + [\Delta J] = [J] - [B][J^l] \quad (25)$$

Donde:

- $[J^r]$ Vector columna de las corrientes de rama de la red radial
- $[J]$ Vector columna de las corrientes de rama de la red mallada

$[B]$ Matriz ($r \times l$) de conexión ramas-lazos básicos
 $[J^l]$ Vector formado por las corrientes de lazo.

Las pérdidas de la red radial resultante serían por tanto:

$$P_{radial} = \sum_{i=1}^n R_i (J_i - B J^l)^2 \quad (26)$$

La ecuación (26) corresponde con las pérdidas de la red radial para uno de los posibles árboles de la red. De la ecuación (26) no se puede deducir por inspección qué conjunto de ramas hay que abrir para obtener la red radial de mínimas pérdidas, dado que el producto $B J^l$ depende de cada árbol y además el número de combinaciones del conjunto de soluciones se eleva considerablemente al aumentar el número de árboles de la red, siendo éste el determinante de la matriz de incidencia por su traspuesta.

3.2 Análisis de una red de alterna

Para una red de corriente alterna formada por un solo lazo, y procediendo de igual forma que para la red de corriente continua, se obtiene que las pérdidas para la red radial k al abrir la rama k , vienen expresadas por la ecuación (27).

$$P(k) = \sum_{i=1}^n R_i |\bar{J}_i - \bar{J}_k|^2 \quad (27)$$

En el caso de una red con l lazos la expresión (27) se expresaría según (28) con las mismas definiciones realizadas en (25).

$$P_{radial} = \sum_{i=1}^n R_i |\bar{J}_i - B \bar{J}^l|^2 \quad (28)$$

Haciendo uso de (27) y desarrollando la diferencia de pérdidas entre dos redes radiales m y k , se alcanza la expresión (29).

$$\begin{aligned} \Delta P = P(m) - P(k) &= \sum_{i=1}^n R_i |\bar{J}_i - \bar{J}_m|^2 - \sum_{i=1}^n R_i |\bar{J}_i - \bar{J}_k|^2 \\ &= \sum_{i=1}^n R_i (J_m^2 - J_k^2) + 2(J_k^a - J_m^a) \sum_{i=1}^n R_i J_i^a + 2(J_k^r - J_m^r) \sum_{i=1}^n R_i J_i^r \end{aligned} \quad (29)$$

Donde:

J_i Corriente por la rama i de la red mallada
 J_i^a Corriente activa por la rama i de la red mallada
 J_i^r Corriente reactiva por la rama i de la red mallada

De la expresión (29) no se concluye regla alguna para discernir cuál es la condición que debe de cumplirse para decidir cuál es la red radial de mínimas pérdidas.

Existen dos casos particulares en donde la ecuación (29) se puede simplificar. El primer

caso corresponde con el caso particular de que la red de alterna estuviese formada por ramas con reactancia nula. En este caso al aplicar la segunda ley de Kirchhoff al lazo se tiene:

$$\sum_{i=1}^n R_i (J_i^a + jJ_i^r) = 0 \Rightarrow \sum_{i=1}^n R_i J_i^a = 0 \quad y \quad \sum_{i=1}^n R_i J_i^r = 0 \quad (30)$$

Al sustituir la ecuación (30) en (29), el incremento de pérdidas queda reducido a la ecuación (35).

El segundo caso particular corresponde con el supuesto de que las reactancias de las líneas sean proporcionales a las resistencias de las mismas, $X_i = kR_i$. Planteando la segunda ley de Kirchhoff:

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^n (R_i + jX_i)(J_i^a + jJ_i^r) &= 0 \\ \sum_{i=1}^n R_i J_i^a - \sum_{i=1}^n X_i J_i^r &= 0 \quad y \\ \sum_{i=1}^n X_i J_i^a + \sum_{i=1}^n R_i J_i^r &= 0 \end{aligned} \quad (31)$$

Sustituyendo la relación de proporcionalidad entre la resistencia y la reactancia de la línea, se obtiene:

$$\sum_{i=1}^n R_i J_i^a - k \sum_{i=1}^n R_i J_i^r = 0 \quad (32)$$

$$k \sum_{i=1}^n R_i J_i^a + \sum_{i=1}^n R_i J_i^r = 0 \quad (33)$$

Multiplicando (33) por la constante de proporcionalidad k y sumándola a (32) se tiene que:

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^n R_i J_i^a &= 0 \\ \sum_{i=1}^n X_i J_i^r &= 0 \\ \sum_{i=1}^n X_i J_i^a &= 0 \\ \sum_{i=1}^n R_i J_i^r &= 0 \end{aligned} \quad (34)$$

Por lo tanto, el incremento de pérdidas corresponde nuevamente con el de la ecuación (35).

$$\Delta P = P(m) - P(k) = \sum_{i=1}^n R_i (J_m^2 - J_k^2) \quad (35)$$

Al igual que en el problema de corriente continua, se deduce de la expresión (35) que la

red radial k sería la red radial de mínimas pérdidas si el valor eficaz de la corriente por la rama k es menor que el valor eficaz de la corriente por la rama m para cualquier rama m de la red mallada. En otras palabras, la red radial de mínimas pérdidas de la red mallada formada por un solo lazo, se formará abriendo la rama por la que circula menor corriente.

3.3 Selección de la heurística

En los apartados anteriores se ha analizado el problema en corriente continua para un solo lazo, donde las cargas se han modelado por fuentes de corriente. En este caso la red radial de mínimas pérdidas es la red obtenida al abrir por la rama que circula menor corriente. Esta rama es una de las dos ramas que confluyen en el nudo de ruptura de los flujos de potencia. En el caso de una red de corriente continua con un número de lazos mayor o igual a 2, elegir abrir la rama del lazo por la que circula menor corriente no asegura la red de mínimas pérdidas. Una aproximación a la hora de buscar ramas candidatas a abrir en cada lazo sería probar con las dos ramas que confluyen en el nudo de ruptura de cada lazo. En este caso, se tendría un número de ramas candidatas igual al doble del número de lazos de la red. Aún así, no se asegura que la solución óptima del problema se encuentre entre el conjunto de ramas candidatas. Ahora bien, se pueden realizar algoritmos de forma que en cada iteración puedan acercarse a una solución, si no la óptima, cerca del óptimo global.

En el caso de una red de corriente alterna, como se ha visto en el apartado anterior, aparece un problema añadido; se poseen dos nudos de ruptura, uno para la potencia activa y otro para la potencia reactiva. Estos nudos de ruptura, a veces pueden coincidir y otras no, e incluso pueden aparecer múltiples nudos de ruptura de potencia reactiva para el caso de que la red posea cargas capacitivas, dado que éstas se comportan como generadores de potencia reactiva.

Teniendo presente lo anterior y conociendo de antemano que la selección de las ramas adyacentes a los nudos de ruptura no tienen por qué ser las ramas a abrir de la solución óptima, se diseñarán algoritmos basados en la propiedad que poseen dichos nudos de ruptura, y es que en ellos confluyen los flujos de potencia.

Por tanto, la heurística a desarrollar en este trabajo se basará en la selección como ramas candidatas, las ramas adyacentes a los nudos de ruptura.

El objetivo de esta heurística persigue reducir el número de ramas candidatas a abrir para cada lazo, y no tener que probar con todas las posibles. Esto reduce considerablemente el número de combinaciones a evaluar y con ello el tiempo de cálculo para alcanzar la solución.

3.3.1 Análisis de los nudos de ruptura

En el apartado 2.5 se realizó una clasificación de los algoritmos analizados en la literatura y se estableció una división clara entre los algoritmos que comienzan con una solución inicial (red radial) y aquéllos que parten de la red mallada.

Ambos tipos de algoritmos pueden ser llevados a cabo mediante el uso de los nudos de ruptura.

En los algoritmos que comienzan con la red radial, la forma de proceder es cerrar una rama formando un lazo. Se calculan los nudos de ruptura de dicho lazo y se eligen como ramas candidatas a abrir las correspondientes al nudo de ruptura. Este proceso se hace repetitivo hasta cumplir un criterio de paro.

Para los algoritmos que comienzan con la red mallada, la filosofía es parecida. De entre todos los nudos de ruptura, bajo un criterio preestablecido se elige un nudo de ruptura y se obtienen las ramas candidatas. Una vez elegida la rama a abrir se vuelven a calcular los nudos de ruptura y se procede hasta que la red final es radial.

Independientemente del tipo de algoritmo que se implemente, es necesario determinar los nudos de ruptura, ya que como se ha comentado anteriormente éstos pueden ser de activa y reactiva.

El proceso para obtener los nudos de ruptura conlleva la obtención de un grafo dirigido (digrafo) de la red. Para ello se resuelve la red y dado que se tienen dos flujos diferenciados (activa y reactiva), se asignan sentidos a las ramas en función del sentido de dichos flujos y se obtienen dos digrafos de la red, uno para los flujos de activa y otro para los flujos de reactiva.

Los nudos de ruptura de activa serán aquéllos en los que concurren dos o más flujos de activa (grado de entrada mayor o igual a 2). Dependiendo de la red y de los flujos de potencia obtenido, se obtendrán nudos de ruptura con diferentes grados de entrada.

Para una red con n nudos y r ramas, la relación entre el número de nudos de ruptura de activa (n_{NR}) y los grados de entrada de dichos nudos es según la expresión (36).

$$n_{NR} = r - (n - 1) - \sum_{i \in NR // g(i) > 2} (g(i) - 2) \quad (36)$$

Donde:

- NR Conjunto de nudos de ruptura
- $g(i)$ Grado de entrada del nudo i
- r Número de ramas de la red
- n Número de nudos de la red

El número de ramas candidatas por cada nudo de ruptura de activa será igual al grado de entrada del nudo en cuestión.

La expresión (36) es válida para los nudos de ruptura del digrafo correspondiente a la potencia activa. Para el digrafo correspondiente a la potencia reactiva, podría obtenerse un mayor número de nudos de ruptura al que se obtiene mediante la expresión (36) si la red posee cargas capacitivas.

3.3.2 Selección de las ramas candidatas

En el supuesto de que los nudos P y los nudos Q coincidan, las ramas candidatas serán las ramas adyacentes al nudo de ruptura. Sin embargo, dado que los nudos de ruptura de activa y reactiva no tienen por qué coincidir, y teniendo en cuenta que el número de nudos de

ruptura de activa tampoco tiene por qué coincidir con el número de nudos de ruptura de reactiva, es necesario, de alguna manera, asociar los nudos P y los nudos Q con el objeto de obtener un conjunto de ramas candidatas.

Para solucionar el problema anteriormente mencionado se plantean dos alternativas:

- Asociar y obtener pares de nudos P y Q, tantos como eslabones o enlaces posea la red.
- Formar un grafo dirigido para una combinación de los flujos de activa y reactiva.

Asociación de pares de nudos P y Q: Nudos P-Q

Para explicar cómo se consigue asociar los nudos de ruptura de potencia activa con los de potencia reactiva para una red en general, se presenta una red ejemplo, con diferentes casos y nudos con diferentes grados de entrada.

En la Figura 5 se han representado los dos grafos dirigidos para la potencia activa y la potencia reactiva de forma superpuesta. Los sentidos de color negro corresponden con los sentidos de los flujos de la potencia activa y reactiva, ambos coincidentes en dichas ramas. En azul aparecen los sentidos de los flujos de la potencia activa y en rojo los de la potencia reactiva. Igualmente, se han representado los nudos de ruptura de potencia activa en azul y los nudos de potencia reactiva en rojo.

En la Tabla 1 se indican los nudos de ruptura de la red de la Figura 5 indicándose los grados de entrada de cada nudo.

Tabla 1 Nudos de ruptura y grados de entrada

Nudos de ruptura de activa	Grado de entrada	Ramas entrantes	Nudos de ruptura de reactiva	Grado de entrada	Ramas entrantes
P ₁	4	S ₁ -S ₂ -S ₃ -S ₄	Q ₁	3	S ₁ -S ₂ -S ₃
P ₂	2	S ₇ -S ₈	Q ₂	2	S ₆ -S ₇
P ₃	2	S ₂₁ -S ₂₂	Q ₃	2	S ₁₄ -S ₁₅
P ₄	2	S ₁₈ -S ₁₉	Q ₄	2	S ₉ -S ₁₀
P ₅	2	S ₁₄ -S ₁₅	Q ₅	2	S ₁₆ -S ₁₇
P ₆	2	S ₁₁ -S ₁₂	Q ₆	2	S ₂₀ -S ₂₃
P ₇	2	S ₂₄ -S ₂₅	Q ₇	3	S ₁₃ -S ₂₇ -S ₂₈

Para la asociación de nudos de activa con nudos de reactiva se tendrán en cuenta las siguientes reglas:

1. El número de veces que será emparejado un nudo será igual al grado de entrada menos uno y habrá tantos emparejamientos como eslabones o enlaces posea la red.
2. Se emparejan en primer lugar los nudos de activa y reactiva coincidentes y se les asigna el menor grado de los nudos emparejados.
3. Cada vez que se realice un emparejamiento, se elimina éste de la tabla de nudos que quedan por emparejar, siempre teniendo en cuenta que un nudo se emparejará tantas

veces como el grado de entrada menos uno.

4. Se comienza con un nudo de activa y se busca un camino simple a través únicamente de las ramas que posean sentidos contrarios hacia un nudo de reactiva que quede por emparejar, quedando dichos nudos emparejados.

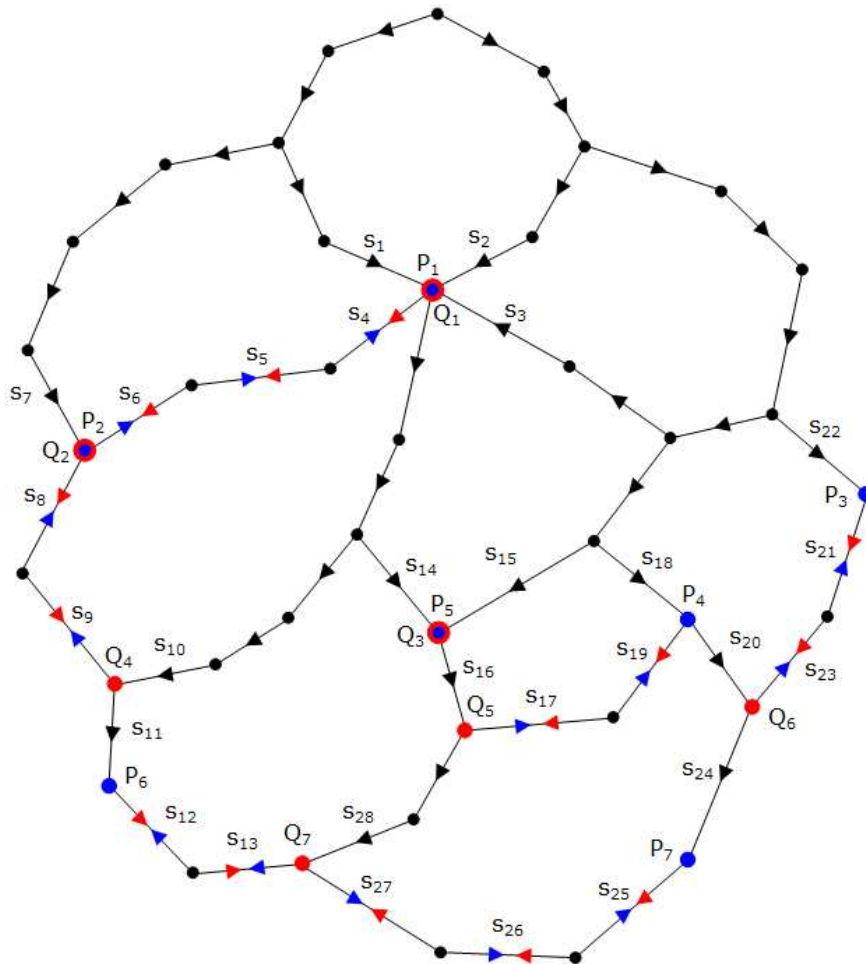


Figura 5 Nudos de ruptura de activa y reactiva

Según lo anterior, en la red de la Figura 5, el nudo P_1 se emparejará tres veces, los nudos Q_1 y Q_7 dos veces cada uno, y el resto sólo una vez.

Una vez asociados los nudos de ruptura, se procede a enumerar las ramas candidatas a abrir para cada emparejamiento. El conjunto de ramas candidatas estará formado por la unión de:

- Ramas entrantes en el nudo de ruptura de activa.
- Ramas entrantes en el nudo de ruptura de reactiva.
- Ramas del camino simple entre los dos nudos a través de las ramas que poseen sentidos opuestos de activa y reactiva.

En la Tabla 2 se resumen los emparejamientos junto con las ramas candidatas para cada par de nudos emparejados.

Tabla 2 Emparejamientos de nudos de ruptura P y Q

Emparejamientos	Ramas candidatas
P_1-Q_1	$S_1-S_2-S_3-S_4$
P_1-Q_1	$S_1-S_2-S_3-S_4$
P_2-Q_2	$S_6-S_7-S_8$
P_5-Q_3	$S_{14}-S_{15}$
P_1-Q_4	$S_1-S_2-S_3-S_4-S_5-S_6-S_8-S_9-S_{10}$
P_3-Q_6	$S_{20}-S_{21}-S_{22}-S_{23}$
P_4-Q_5	$S_{16}-S_{17}-S_{18}-S_{19}$
P_6-Q_7	$S_{11}-S_{12}-S_{13}-S_{27}-S_{28}$
P_7-Q_7	$S_{13}-S_{24}-S_{25}-S_{26}-S_{27}-S_{28}$

Grafo dirigido único para los flujos de activa y reactiva: Nudos PQ

Otra alternativa para obtener las ramas candidatas es buscar una función que relacione los flujos de activa y reactiva, obteniéndose un único sentido para los flujos de potencia.

Para ello, cuando se posean flujos de activa y reactiva con sentidos opuestos, se asignará el sentido al flujo que posea mayor valor absoluto. En otras palabras, tomando un sentido de referencia se realizará la suma algebraica de las potencias activa y reactiva. Si dicha suma es positiva se asignará el sentido de referencia, por el contrario si la suma es negativa se invertirá el sentido. En la Figura 6 se ha representado dicha función.

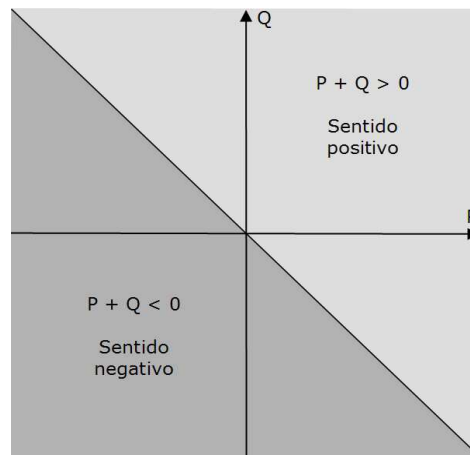


Figura 6 Sentido del flujo de potencia

Al aplicar el criterio anterior a una red se sigue cumpliendo la expresión (36). En este caso, las ramas candidatas corresponden con las ramas con flujos de potencia entrantes en el nudo de ruptura denominado PQ.

Tras aplicar el criterio establecido en la Figura 6 a la red de la Figura 5, un resultado posible hubiera sido el representado en la Figura 7. En dicha red todos los nudos de ruptura son de grado 2 salvo el nudo PQ_1 que es de grado 3. Para este nudo, de entre las ramas candidatas a la hora de abrir se eligen dos de entre las tres posibles.

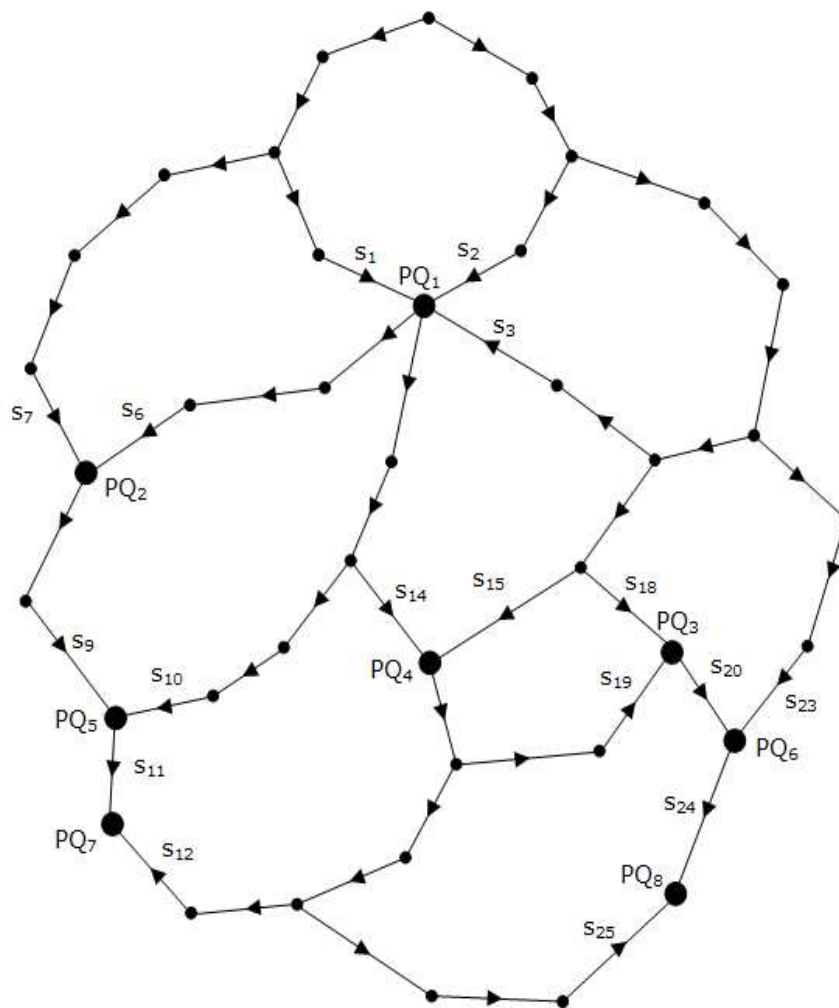


Figura 7 Grafo dirigido único para los flujos de activa y reactiva

En la Tabla 3 se relacionan los nudos PQ, su grado de entrada y las ramas candidatas a abrir.

Tabla 3 Nudos de ruptura PQ y sus ramas candidatas

Nudos PQ	Grado de entrada	Ramas candidatas
PQ ₁	3	S ₁ -S ₂ -S ₃
PQ ₂	2	S ₇ -S ₈
PQ ₃	2	S ₁₈ -S ₁₉
PQ ₄	2	S ₁₄ -S ₁₅
PQ ₅	2	S ₉ -S ₁₀
PQ ₆	2	S ₂₀ -S ₂₃
PQ ₇	2	S ₁₁ -S ₁₂
PQ ₈	2	S ₂₄ -S ₂₅

Capítulo 4

ALGORITMOS

Una vez establecida la heurística, se realizarán diferentes búsquedas de la solución, basándose en los nudos de ruptura. Cada una de estas búsquedas se abordará planteando diferentes algoritmos.

Principalmente, tal como se ha mencionado en los capítulos anteriores, existen dos grandes grupos de algoritmos, aquéllos que parten de una solución dada y aquéllos que parten de la red mallada. Sin embargo, es posible realizar algoritmos híbridos o mixtos sobre la base de los dos grupos anteriores.

En este trabajo se han analizado y estudiado diferentes combinaciones entre ellos. De entre las innumerables posibilidades analizadas, sólo se han plasmado en este documento aquéllas que han alcanzado resultados satisfactorios.

Los algoritmos tratados en este trabajo, finalmente, se agrupan en:

- Algoritmos mallados
- Algoritmos radiales
- Algoritmos radiales en serie
- Algoritmos híbridos
- Algoritmos híbridos con reinicio

Con el objeto de una mayor comprensión de los algoritmos, se ha realizado una descripción literal de los mismos resaltando su característica principal, y al mismo tiempo se presenta su implementación en pseudocódigo. Se ha intentado en la medida de lo posible, utilizar las mismas variables en cada uno de los algoritmos con la finalidad de una mayor claridad y también para ver las diferencias entre los algoritmos.

En cuanto al lenguaje de programación, por funcionalidad y rapidez de diseño, se ha

utilizado el software comercial MATLAB®, en particular la versión 7.0 (R14) . Para la resolución de los repartos de carga mediante el método de Newton-Raphson se ha utilizado una librería para el cálculo de flujos de potencia denominada MATPOWER© versión 3.0 para MATLAB®, suministrada libre de cargo por la organización *Power Systems Engineering Research Center* (PSERC).

En el diseño de los algoritmos se ha optado por una programación funcional y estructurada, y que permita la impresión de resultados parciales para estudiar la evolución de los algoritmos. Con ello se han podido realizar múltiples pruebas de test de los algoritmos y de sus respectivas variantes. Por tanto, el código no está optimizado para que su ejecución sea la más rápida. Sólo para los algoritmos más prometedores se ha optimizado el código, resultando en estos casos una mejora sustancial del tiempo de ejecución.

4.1 Algoritmos mallados

Tal como se comentó en el apartado 2.5.1 , los algoritmos mallados poseen una estructura general común a todos ellos. Inicialmente se considera la red con todas las ramas cerradas. Para dicha red, se obtienen los nudos de ruptura, estableciendo el conjunto de ramas candidatas a abrir como la unión de las ramas candidatas de cada nudo de ruptura.

Los diferentes criterios a la hora de seleccionar las ramas a abrir de entre el conjunto de ramas candidatas dará lugar a diferentes algoritmos. Estos criterios han sido:

- Considerar o no el cambio del patrón de flujos de la red.
- Uso de los diferentes nudos de ruptura (P y Q, PQ y P-Q).
- El orden de evaluación de los nudos de ruptura obtenidos.
- Iteraciones del algoritmo.

En la Tabla 4 se resumen los diferentes algoritmos implementados para resolver el problema de reconfiguración de redes. En concreto se han realizado cuatro algoritmos mallados y sus variantes.

El número de nudos de ruptura de una red, generalmente, coincide con el número de lazos de la red, salvo que dichos nudos posean grados de entrada superior a dos. Para cada nudo de ruptura se elige de entre las ramas candidatas, aquélla que provoca una mayor reducción de pérdidas. Cada vez que se elige una rama, se abre un lazo y la red obtenida en cada paso posee un lazo menos. Al final del algoritmo se alcanza la red radial.

Cada vez que se abre un lazo, el patrón de flujo por las ramas cambia y por tanto los nudos de ruptura pueden cambiar en los sucesivos pasos para alcanzar la red radial. Si se elige un orden para seleccionar los nudos de ruptura, por ejemplo, el de máxima tensión, tras acabar el algoritmo el último lazo abierto corresponde con el nudo de ruptura de mínima tensión.

El nudo de ruptura de mínima tensión es generalmente el nudo de ruptura más alejado del nudo alimentador. Es razonable pensar que la rama abierta en último lugar es una seria

candidata a la solución final. El motivo es que cualquier cambio en el último lazo afecta poco al patrón de flujos de la red. Sin embargo, cambios en los lazos que están más cerca del nudo de alimentación, provocarán cambios significativos en el patrón de flujos de la red.

Tabla 4 Algoritmos mallados

Algoritmo	Nudos de ruptura	Descripción	Criterio ordenación
M-01	PQ	Único cálculo de los nudos de ruptura de la red mallada	Ordenación por máxima tensión de los nudos de ruptura
M-02	PQ	Se recalculan los nudos de ruptura en cada paso del algoritmo	Ordenación por máxima tensión de los nudos de ruptura
		Var. 1	Ordenados por máxima tensión. Si cambia el orden con respecto al cálculo previo se salta al siguiente nudo de ruptura
		Var. 2	Cambio del criterio de ordenación de máxima a mínima, y viceversa si cambia el orden con respecto al cálculo previo
		Var. 3	Se ordenan los nudos de ruptura PQ en función de las pérdidas obtenidas al eliminar la mejor opción de entre sus ramas candidatas.
		Var. 4	Se ordenan los nudos de ruptura PQ en función del perfil de tensiones obtenido al eliminar la mejor opción de entre sus ramas candidatas.
		Var. 5	Se ordenan los nudos de ruptura PQ en función del perfil de la diferencia de tensiones de los nudos de ruptura entre dos pasos del algoritmo, obtenido al eliminar la mejor opción de entre sus ramas candidatas.
M-03	PQ, P y Q	Se recalculan los nudos en cada paso del algoritmo. En el último paso se usan los nudos P y Q para obtener el par P-Q.	Ordenación por máxima tensión de los nudos de ruptura
M-04	Pares P-Q	Se recalculan los nudos de ruptura en cada paso del algoritmo	Ordenación por máxima tensión de la media de los nudos de ruptura que forman el par P-Q

Teniendo en cuenta lo anterior, se ha pensado en un algoritmo iterativo para cada uno de los cuatro algoritmos mallados propuestos, donde al alcanzar una solución tras su ejecución, vuelva a ejecutarse pero dejando definitivamente abierta la última rama que corresponde con el lazo del nudo de ruptura de mínima tensión. Iterativamente, se ejecuta el algoritmo hasta que al final se alcance la red radial. Esta versión, denominada iterativa, necesita mayor tiempo de cómputo pero alcanza soluciones más óptimas.

4.1.1 Algoritmo mallado M-01

Este algoritmo resuelve la red mallada y obtiene un grafo dirigido de la red asignando un sentido único a los flujos de potencia por las ramas según la Figura 6 . De esta forma se obtienen los nudos de ruptura denominados anteriormente nudos PQ.

Para cada nudo de ruptura, se seleccionan las ramas candidatas y se resuelve la red abriendo cada una de las ramas candidatas, eligiéndose como rama a abrir la rama candidata que haya producido una mayor reducción de pérdidas. La rama elegida se deja abierta, y para el siguiente nudo de ruptura PQ se vuelve a elegir la mejor rama de entre sus candidatas. Este proceso se continúa hasta haber evaluado todos los nudos de ruptura.

El orden establecido para ir abriendo la red mallada ha sido comenzar por los nudos de ruptura de mayor tensión.

1. Inicializar las lista: RAMA_ABIERTAS = [].
2. Resolver la red mallada y crear una lista con los nudos PQ: NUDOS_PQ.
3. Ordenar la lista NUDOS_PQ, de mayor a menor tensión de los nudos.
4. Para cada nudo(i) de la lista NUDOS_PQ comenzando por el de mayor tensión:
 - a) Seleccionar como ramas candidatas (CANDIDATAS), las ramas con flujo de potencia entrante en el nudo(i).
 - b) Para cada rama(j) de la lista CANDIDATAS:
 - Abrir la rama(j) junto con RAMAS_ABIERTAS y resolver la red.
 - Calcular las pérdidas y almacenarlas en P(j).
 - c) Seleccionar como RAMA_A_ABRIR la rama de entre CANDIDATAS que posea las menores pérdidas de P.
 - d) Actualizar: RAMAS_ABIERTAS = [RAMAS_ABIERTAS, RAMA_A_ABRIR].
5. SOLUCION = RAMAS_ABIERTAS.

4.1.2 Algoritmo mallado M-01 iterativo

La versión iterativa de este algoritmo, al igual que ocurre con el resto de algoritmos mallados, consiste en realizar tantas pasadas del algoritmo M-01 como enlaces o bucles posee la red. En cada pasada se elige como rama definitiva a abrir la última que se abrió en el algoritmo M-01.

Al estar ordenados los nudos de ruptura por máxima tensión, la rama definitiva a abrir en cada pasada corresponde con la rama de entre las ramas candidatas del nudo de ruptura de menor tensión que produzcan menores pérdidas.

El pseudocódigo del algoritmo es el siguiente:

1. Inicializar la lista: RAMA_DEFINITIVAS = [].
2. Inicializar la lista: RAMA_ABIERTAS = [].
 - a) Resolver la red abriendo las ramas de la lista RAMAS_DEFINITIVAS y crear una lista con los nudos PQ: NUDOS_PQ.
 - b) Ordenar la lista NUDOS_PQ, de mayor a menor tensión de los nudos.
 - c) Para cada nudo(i) de la lista NUDOS_PQ comenzando por el de mayor tensión:
 - Seleccionar como ramas candidatas (CANDIDATAS), las ramas con flujo de potencia entrante en el nudo(i).
 - Para cada rama(j) de la lista CANDIDATAS:
 - Abrir la rama(j) junto con RAMAS_ABIERTAS y resolver la red.
 - Calcular las pérdidas y almacenarlas en P(j).
 - Seleccionar como RAMA_A_ABRIR la rama de entre CANDIDATAS que posea las menores pérdidas de P.
 - Actualizar: RAMAS_ABIERTAS = [RAMAS_ABIERTAS, RAMA_A_ABRIR].
 - d) Actualizar la última rama abierta: ULTIMA = RAMA_A_ABRIR.
 - e) Actualizar RAMAS_DEFINITIVAS = [RAMAS_DEFINITIVAS, ULTIMA].
 - f) Si la longitud de RAMAS_DEFINITIVAS es menor que el número de enlaces o bucles de la red, actualizar RAMAS_ABIERTAS = RAMAS_DEFINITIVAS y volver al paso 2a, si no, continuar.
3. SOLUCION = RAMAS_DEFINITIVAS.

4.1.3 Algoritmo mallado M-02

En el algoritmo M-01, los nudos de ruptura son fijos. Es decir, conforme la red se va abriendo al ir formando la red radial no se recalculan los nudos de ruptura de la nueva topología de la red. Dado que el patrón de los flujos va cambiando conforme la red se hace radial, es previsible que los nudos de ruptura también cambien.

En este nuevo algoritmo se tiene en cuenta el cambio del patrón de los flujos de la red conforme la red en cada paso se va conformando hasta llegar a la red radial. Para ello, cada vez que se elige una rama de entre las candidatas del nudo de ruptura, se vuelve a resolver la red y por tanto a calcular los posibles nuevos nudos de ruptura. Este tratamiento permite afinar más en la solución a costa de hacer más lento el algoritmo por tener que realizar más repartos de carga.

Al igual que el algoritmo M-01 obtiene los nudos de ruptura (nudos PQ) a partir de un grafo dirigido de la red en función de las potencias activa y reactiva según la Figura 6 . El orden en el que se evalúan los nudos de ruptura corresponde con el criterio de máxima tensión.

El pseudocódigo del algoritmo es el siguiente:

1. Inicializar la lista de ramas abiertas: $\text{RAMAS_ABIERTAS} = []$.
2. Resolver la red abriendo las ramas de la lista RAMAS_ABIERTAS y crear una lista con los nudos PQ: NUDOS_PQ .
3. Seleccionar de la lista NUDOS_PQ , el nudo que posea mayor tensión: $\text{NUDO_PQ}_{\text{MAX}}$.
4. Seleccionar como ramas candidatas (CANDIDATAS), las ramas con flujo de potencia entrante en el nudo $\text{NUDO_PQ}_{\text{MAX}}$.
5. Para cada rama(j) de CANDIDATAS :
 - a) Abrir la rama(j) junto con RAMAS_ABIERTAS y resolver la red.
 - b) Calcular las pérdidas y almacenarlas en $P(j)$.
6. Seleccionar como rama a abrir (RAMA_A_ABRIR), la rama de entre CANDIDATAS que posea las menores pérdidas de P .
7. Actualizar $\text{RAMAS_ABIERTAS} = [\text{RAMAS_ABIERTAS}, \text{RAMA_A_ABRIR}]$.
8. Si la longitud de la lista RAMAS_ABIERTAS es menor al número de enlaces de la red volver al paso 2.
9. $\text{SOLUCION} = \text{RAMAS_ABIERTAS}$.

4.1.4 Algoritmo mallado M-02 iterativo

Este algoritmo corresponde con la versión iterativa del algoritmo anterior (M-02), donde se realizan tantas pasadas como enlaces posee la red. Al realizar por completo el algoritmo M-02, en vez de tomar la solución del mismo como definitiva, se queda únicamente con la última rama abierta como definitiva y vuelve a ejecutar el algoritmo M-02 tantas veces como enlaces o bucles posea la red mallada de partida.

Al estar ordenados los nudos de ruptura por máxima tensión, la rama definitiva a abrir en cada pasada corresponde con la rama de entre las ramas candidatas del nudo de ruptura de menor tensión que produzcan menores pérdidas.

El pseudocódigo del algoritmo es el siguiente:

1. Inicializar la lista: RAMAS_DEFINITIVAS = [].
2. Inicializar la lista de ramas abiertas: RAMAS_ABIERTAS = [].
 - a) Resolver la red abriendo las ramas de la lista RAMAS_ABIERTAS y crear una lista con los nudos PQ: NUDOS_PQ.
 - b) Seleccionar de la lista NUDOS_PQ, el nudo que posea mayor tensión: NUDO_PQ_{MAX}.
 - c) Seleccionar como ramas candidatas (CANDIDATAS), las ramas con flujo de potencia entrante en el nudo NUDO_PQ_{MAX}.
 - d) Para cada rama(j) de CANDIDATAS:
 - Abrir la rama(j) junto con RAMAS_ABIERTAS y resolver la red.
 - Calcular las pérdidas y almacenarlas en P(j).
 - e) Seleccionar como rama a abrir (RAMA_A_ABRIR), la rama de entre CANDIDATAS que posea las menores pérdidas de P.
 - f) Actualizar RAMAS_ABIERTAS = [RAMAS_ABIERTAS, RAMA_A_ABRIR].
 - g) Actualizar la última rama abierta: ULTIMA = RAMA_A_ABRIR.
 - h) Si la longitud de la lista RAMAS_ABIERTAS es menor que el número de enlaces de la red, volver al paso 2a.
3. Actualizar RAMAS_DEFINITIVAS = [RAMAS_DEFINITIVAS, ULTIMA].
4. Si la longitud de RAMAS_DEFINITIVAS es menor al número de enlaces de la red, actualizar RAMAS_ABIERTAS = RAMAS_DEFINITIVAS y volver al paso 2a.
5. SOLUCION = RAMAS_DEFINITIVAS.

4.1.5 Algoritmo mallado M-02 variante 1

En el algoritmo M-02 se ha observado que al recalcular los nudos de ruptura en cada paso, éstos pueden cambiar por ser diferentes o bien alterarse el orden por cambiar el módulo de sus tensiones. Con el objeto de seleccionar primero aquéllos nudos que no sufren cambios, se ha realizado una modificación en el algoritmo de forma que cuando se produzca un cambio en el patrón de los nudos de ruptura se elija el siguiente nudo de ruptura en la lista.

Cada vez que se calculan los nudos de ruptura PQ y se ordenan por tensión, se compara con los nudos PQ obtenidos antes de seleccionar la rama abrir, habiendo eliminado el nudo PQ seleccionado anteriormente. Si el nuevo nudo de ruptura seleccionado coincide con el de la lista anterior, se elige, y si no coincide se elige el siguiente que coincida. Esta variante en el algoritmo pretende atacar primeramente los nudos menos sensibles a cambios en la configuración de la red.

El pseudocódigo del algoritmo es el siguiente:

1. Inicializar la lista de ramas abiertas: RAMAS_ABIERTAS = [].
2. NUDOS_PQ_antiguos = NUDOS_PQ. Se extrae de NUDOS_PQ_old el nudo seleccionado.
3. Resolver la red abriendo las ramas de la lista RAMAS_ABIERTAS y crear una lista con los nudos PQ: NUDOS_PQ.
4. Seleccionar de la lista NUDOS_PQ, el nudo que posea mayor tensión: NUDO_PQ_{MAX}, siempre y cuando coincida con el nudo que posea mayor tensión de la lista NUDOS_PQ_old. Si no, se elige el siguiente que coincida.
5. Seleccionar como ramas candidatas (CANDIDATAS), las ramas con flujo de potencia entrante en el nudo NUDO_PQ_{MAX}.
6. Para cada rama(j) de CANDIDATAS:
 - a) Abrir la rama(j) junto con RAMAS_ABIERTAS y resolver la red.
 - b) Calcular las pérdidas y almacenarlas en P(j).
7. Seleccionar como rama a abrir (RAMA_A_ABRIR), la rama de entre CANDIDATAS que posea las menores pérdidas de P.
8. Actualizar RAMAS_ABIERTAS = [RAMAS_ABIERTAS, RAMA_A_ABRIR].
9. Si la longitud de la lista RAMAS_ABIERTAS es menor al número de enlaces de la red volver al paso 2.
10. SOLUCION = RAMAS_ABIERTAS.

4.1.6 Algoritmo mallado M-02 variante 2

Este algoritmo es una variante del algoritmo M-02. Cada vez que se calculan los nudos de ruptura PQ y se ordenan de mayor a menor tensión, se compara con los nudos de ruptura PQ obtenidos antes de seleccionar la rama abrir, habiendo eliminado el nudo PQ seleccionado anteriormente. Si el nuevo nudo seleccionado coincide con el de la lista anterior, se elige, y si no coincide se cambia el criterio de ordenación ordenándolos de menor a mayor tensión.

Esta variante en el algoritmo pretende evitar los nudos más sensibles ante cambios en la red. La elección de ordenarlos por mínima tensión, aunque se conoce que no se obtienen mejores resultados en general, se aborda porque en determinados casos obtienen buenas soluciones.

El pseudocódigo del algoritmo es el siguiente:

1. Inicializar la lista de ramas abiertas: $RAMAS_ABIERTAS = []$.
2. $NUDOS_PQ_antiguos = NUDOS_PQ$. Se extrae de $NUDOS_PQ_old$ el nudo seleccionado.
3. Resolver la red abriendo las ramas de la lista $RAMAS_ABIERTAS$ y crear una lista con los nudos PQ: $NUDOS_PQ$.
4. Seleccionar de la lista $NUDOS_PQ$, el nudo que posea mayor o menor tensión: $NUDO_PQ_{MAX/MIN}$, siempre y cuando coincida con el nudo que posea mayor/menor tensión de la lista $NUDOS_PQ_old$. Si no, se cambia el criterio y se reinicia el paso 4.
5. Seleccionar como ramas candidatas ($CANDIDATAS$), las ramas con flujo de potencia entrante en el nudo $NUDO_PQ_{MAX/MIN}$.
6. Para cada rama(j) de $CANDIDATAS$:
 - a) Abrir la rama(j) junto con $RAMAS_ABIERTAS$ y resolver la red.
 - b) Calcular las pérdidas y almacenarlas en $P(j)$.
7. Seleccionar como rama a abrir ($RAMA_A_ABRIR$), la rama de entre $CANDIDATAS$ que posea las menores pérdidas de P .
8. Actualizar $RAMAS_ABIERTAS = [RAMAS_ABIERTAS, RAMA_A_ABRIR]$.
9. Si la longitud de la lista $RAMAS_ABIERTAS$ es menor al número de enlaces de la red volver al paso 2.
10. $SOLUCION = RAMAS_ABIERTAS$.

4.1.7 Algoritmo mallado M-02 variante 3

A diferencia del algoritmo M-02 donde se elige para cada nudo de ruptura PQ las ramas que provocan menores pérdidas comenzando por el nudo PQ que posee mayor tensión, en esta nueva variante del algoritmo se elige como rama a abrir de todos los nudos de ruptura PQ, la que provoca menores pérdidas. Es decir, se ordenan los nudos de ruptura PQ en función de las pérdidas obtenidas al eliminar la mejor de sus ramas candidatas. Esta ordenación, conlleva evidentemente a un mayor número de repartos de carga.

Luego, deja esta rama abierta, vuelve a calcular los nudos de ruptura PQ y repite el proceso hasta que no quedan nudos PQ. En resumen, es igual que el algoritmo M-02, sólo que en vez de atacar al nudo PQ de mayor tensión, ataca al nudo de ruptura PQ tal que al abrir alguna de sus ramas entrantes provoca las menores pérdidas.

La opción de realizar iteraciones de este algoritmo al igual que se ha hecho con los anteriores no tiene sentido dado que los nudos no se ordenan por máxima tensión.

El pseudocódigo del algoritmo es el siguiente:

1. Inicializar la lista de ramas abiertas: RAMAS_ABIERTAS = [].
2. Resolver la red abriendo las ramas de la lista RAMAS_ABIERTAS y crear una lista con los nudos PQ: NUDOS_PQ.
3. Inicializar: RAMAS = [] y P = [].
4. Para cada nudo(i) de la lista NUDOS_PQ:
 - a) Seleccionar como ramas candidatas (CANDIDATAS), las ramas con flujo de potencia entrante en el nudo(i).
 - b) Para cada rama(j) de la lista CANDIDATAS:
 - Abrir la rama(j) junto con RAMAS_ABIERTAS y resolver la red.
 - Calcular las pérdidas y almacenarlas en P(i,j).
 - Añadir a RAMAS(i,j) la rama(j).
5. Seleccionar como RAMA_A_ABRIR la rama de entre RAMAS que posea las menores pérdidas de P.
6. Actualizar RAMAS_ABIERTAS = [RAMAS_ABIERTAS, RAMA_A_ABRIR].
7. Si la longitud de la lista RAMAS_ABIERTAS es menor al número de enlaces de la red volver al paso 2.
8. SOLUCION = RAMAS_ABIERTAS.

4.1.8 Algoritmo mallado M-02 variante 4

En este algoritmo se resuelve la red mallada y se obtienen los nudos PQ. Para cada rama entrante en cada nudo, tras abrir dicha rama, se calculan las tensiones de los nudos de ruptura PQ, obteniéndose un perfil de tensiones para los nudos PQ. Se elige como rama a abrir de entre todas las entrantes a los nudos PQ, aquella que produzca un mejor perfil de tensiones.

La calidad del perfil de tensiones se ha definido atendiendo a varios criterios. Se han realizado por tanto subvariantes de este algoritmo para cada uno de los criterios. Los diferentes criterios han sido:

- Seleccionar el perfil de tensiones cuya mínima tensión sea la máxima de entre los perfiles a elegir.
- Seleccionar el perfil de tensiones cuya norma sea máxima.
- Seleccionar el perfil con la mínima desviación estándar del vector de tensiones.
- Seleccionar el perfil con el máximo valor medio del vector de tensiones.
- Seleccionar el perfil con el máximo valor de la mediana del vector de tensiones.

El pseudocódigo del algoritmo es el siguiente:

1. Inicializar la lista de ramas abiertas: RAMAS_ABIERTAS = [].
2. Resolver la red abriendo las ramas de la lista RAMAS_ABIERTAS y crear una lista con los nudos PQ: NUDOS_PQ.
3. Inicializar: RAMAS = [] y P = [].
4. Para cada nudo(i) de la lista NUDOS_PQ:
 - a) Seleccionar como ramas candidatas (CANDIDATAS), las ramas con flujo de potencia entrante en el nudo(i).
 - b) Para cada rama(j) de la lista CANDIDATAS:
 - Abrir la rama(j) junto con RAMAS_ABIERTAS y resolver la red.
 - Calcular las pérdidas y almacenarlas en P(i,j).
 - Añadir a RAMAS(i,j) la rama(j).
5. Seleccionar como RAMA_A_ABRIR la rama de entre RAMAS que posea el mejor perfil de tensiones para los nudos PQ.
6. Actualizar RAMAS_ABIERTAS = [RAMAS_ABIERTAS, RAMA_A_ABRIR].
7. Si la longitud de la lista RAMAS_ABIERTAS es menor al número de enlaces de la red volver al paso 2.
8. SOLUCION = RAMAS_ABIERTAS.

4.1.9 Algoritmo mallado M-02 variante 5

En esta variante del algoritmo M-02, se prueba con un nuevo criterio de ordenación basado en las tensiones de los nudos de ruptura. En particular, se ordena en función de la diferencia de tensión de las tensiones de los nudos de ruptura PQ producida al abrir la rama candidata.

Obtenidos los nudos de ruptura, para cada rama entrante en cada nudo tras abrir dicha rama, se resuelve la red y se calculan las tensiones de los nudos PQ, obteniéndose un perfil de tensiones para los nudos PQ. Se calcula la diferencia entre dicha tensión y la tensión del nudo de la red mallada antes de abrir la rama. Como rama a abrir se plantean dos opciones; o bien se elige la rama que provoca el menor incremento de tensión (opción 1), o bien la rama que provoca menores pérdidas de entre las ramas del nudo con menor incremento de tensión con respecto a la red mallada de entre las ramas entrantes a dicho nudo (opción 2).

El pseudocódigo del algoritmo es el siguiente:

1. Inicializar la lista de ramas abiertas: $RAMAS_ABIERTAS = []$.
2. Resolver la red abriendo las ramas de la lista $RAMAS_ABIERTAS$ y crear una lista con los nudos PQ: $NUDOS_PQ$.
3. Inicializar: $RAMAS = []$ y $P = []$.
4. Para cada nudo(i) de la lista $NUDOS_PQ$
 - a) Seleccionar como ramas candidatas ($CANDIDATAS$), las ramas con flujo de potencia entrante en el nudo(i).
 - b) Para cada rama(j) de la lista $CANDIDATAS$
 - Abrir la rama(j) junto con $RAMAS_ABIERTAS$ y resolver la red.
 - Calcular las pérdidas y almacenarlas en $P(i,j)$.
 - Añadir a $RAMAS(i,j)$ la rama(j).
5. Seleccionar como $RAMA_A_ABRIR$ la rama de entre $RAMAS$ que posea el menor incremento de tensión con respecto a la red mallada (opción 1), o bien, la rama que provoca menores pérdidas de entre las ramas del nudo con menor incremento de tensión con respecto a la red mallada de entre las ramas entrantes a dicho nudo (opción 2).
6. Actualizar $RAMAS_ABIERTAS = [RAMAS_ABIERTAS, RAMA_A_ABRIR]$.
7. Si la longitud de la lista $RAMAS_ABIERTAS$ es menor al número de enlaces de la red volver al paso 2.
8. $SOLUCION = RAMAS_ABIERTAS$.

4.1.10 Algoritmo mallado M-03

Este algoritmo es una mejora del algoritmo M-02. Teniendo en cuenta que el último nudo de ruptura que se evalúa es el menos sensible al cambio en el patrón de los flujos por la red, en vez de utilizar el nudo PQ, se utilizará los nudos P y Q del último lazo. Esto aumenta, en el caso que dichos nudos de ruptura no coincidan, el número de ramas candidatas.

Las ramas candidatas para el último lazo serán la unión de las ramas entrantes en dichos nudos y de las ramas que forman el camino simple entre los nudos P y Q sin pasar por el nudo raíz que alimenta al bucle.

El pseudocódigo del algoritmo es el siguiente:

1. Inicializar la lista de ramas abiertas: RAMAS_ABIERTAS = [].
2. Si la longitud de la lista RAMAS_ABIERTAS es menor que el número de enlaces menos uno seguir con el paso 3, si no, ir al paso 4.
3. NUDOS PQ
 - a) Resolver la red abriendo las ramas de la lista RAMAS_ABIERTAS y crear una lista con los nudos PQ: NUDOS_PQ.
 - b) Seleccionar de la lista NUDOS_PQ, el nudo que posea mayor tensión: NUDO_PQ_{MAX}.
 - c) Seleccionar como ramas candidatas (CANDIDATAS), las ramas con flujo de potencia entrante en el nudo NUDO_PQ_{MAX}.
 - d) Para cada rama(j) de CANDIDATAS:
 - Abrir la rama(j) junto con RAMAS_ABIERTAS y resolver la red.
 - Calcular las pérdidas y almacenarlas en P(j).
 - e) Seleccionar como rama a abrir (RAMA_A_ABRIR), la rama de entre la lista CANDIDATAS que posea las menores pérdidas de P.
 - f) Actualizar RAMAS_ABIERTAS = [RAMAS_ABIERTAS, RAMA_A_ABRIR].
 - g) Volver al paso 2.
4. NUDOS P y NUDOS Q
 - a) Resolver la red abriendo las ramas de la lista RAMAS_ABIERTAS y obtener el nudo P y el nudo Q: (NUDO_P y NUDO_Q).
 - b) Seleccionar como ramas candidatas (CANDIDATAS); las ramas con flujo de potencia entrante en el nudo NUDO_P, las ramas con flujo de potencia entrante en el nudo NUDO_Q, junto con las ramas del camino entre los nudos NUDO_P y NUDO_Q sin pasar por el nudo raíz del bucle.
 - c) Para cada rama(j) de CANDIDATAS:
 - Abrir la rama(j) junto con RAMAS_ABIERTAS y resolver la red.
 - Calcular las pérdidas y almacenarlas en P(j).
 - d) Seleccionar como rama a abrir (RAMA_A_ABRIR), la rama de entre CANDIDATAS que posea las menores pérdidas de P.
 - e) Actualizar RAMAS_ABIERTAS = [RAMAS_ABIERTAS, RAMA_A_ABRIR].
5. SOLUCION = RAMAS_ABIERTAS.

4.1.11 Algoritmo mallado M-03 iterativo

Este algoritmo corresponde con la versión iterativa del algoritmo anterior (M-03), donde se realizan tantas pasadas del algoritmo M-03 como enlaces o bucle posee la red.

El pseudocódigo del algoritmo es el siguiente:

1. Inicializar la lista de ramas definitivas: $RAMAS_DEFINITIVAS = []$.
2. Inicializar la lista de ramas abiertas: $RAMAS_ABIERTAS = []$.
 - a) Si la longitud de la lista $RAMAS_ABIERTAS$ es menor que el número de enlaces menos uno continuar con el paso 2b, si no, ir al paso 2c.
 - b) NUDOS PQ
 - Resolver la red abriendo las ramas de la lista $RAMAS_ABIERTAS$ y crear una lista con los nudos PQ: $NUDOS_PQ$.
 - Seleccionar de la lista $NUDOS_PQ$, el nudo que posea mayor tensión: $NUDO_PQ_{MAX}$.
 - Seleccionar como ramas candidatas ($CANDIDATAS$), las ramas con flujo de potencia entrante en el nudo $NUDO_PQ_{MAX}$.
 - Para cada rama(j) de $CANDIDATAS$:
 - Abrir la rama(j) junto con $RAMAS_ABIERTAS$ y resolver la red.
 - Calcular las pérdidas y almacenarlas en $P(j)$.
 - Seleccionar como rama a abrir ($RAMA_A_ABRIR$), la rama de entre la lista $CANDIDATAS$ que posea las menores pérdidas de P .
 - Actualizar $RAMAS_ABIERTAS = [RAMAS_ABIERTAS, RAMA_A_ABRIR]$.
 - Volver al paso 2a.
 - c) NUDOS P y NUDOS Q
 - Resolver la red abriendo las ramas de la lista $RAMAS_ABIERTAS$ y obtener el nudo P y el nudo Q: ($NUDO_P$ y $NUDO_Q$).
 - Seleccionar como ramas candidatas ($CANDIDATAS$); las ramas con flujo de potencia entrante en el nudo $NUDO_P$, las ramas con flujo de potencia entrante en el nudo $NUDO_Q$, junto con las ramas del camino entre los nudos $NUDO_P$ y $NUDO_Q$ sin pasar por el nudo raíz del bucle.
 - Para cada rama(j) de $CANDIDATAS$:
 - Abrir la rama(j) junto con $RAMAS_ABIERTAS$ y resolver la red.
 - Calcular las pérdidas y almacenarlas en $P(j)$.
 - Seleccionar como rama a abrir ($RAMA_A_ABRIR$), la rama de entre $CANDIDATAS$ que posea las menores pérdidas de P .
 - Actualizar $RAMAS_ABIERTAS = [RAMAS_ABIERTAS, RAMA_A_ABRIR]$.
 - Actualizar la última rama abierta: $ULTIMA = RAMA_A_ABRIR$.
 - d) Actualizar $RAMAS_DEFINITIVAS = [RAMAS_DEFINITIVAS, ULTIMA]$
3. Si la longitud de $RAMAS_DEFINITIVAS$ es menor al número de enlaces de la red, actualizar $RAMAS_ABIERTAS = RAMAS_DEFINITIVAS$ y volver al paso 2a.
4. $SOLUCION = RAMAS_DEFINITIVAS$.

4.1.12 Algoritmo mallado M-04

Este algoritmo se basa en la obtención de las ramas candidatas mediante la asociación de pares de nudos P y Q, es decir, obteniendo el par P-Q tal como se ha explicado en el apartado 3.3.2. El algoritmo calcula los nudos P y los nudos Q, en atención a sus correspondientes grafos dirigidos. Relaciona los nudos P y Q de forma que pertenezcan a un mismo lazo. De esta forma crea tantas parejas de nudos P y nudos Q como lazos posea la red. Para cada pareja de nudos P y Q selecciona las ramas candidatas a abrir. El conjunto de ramas candidatas para cada pareja de nudos P y Q, será la unión de las ramas que entran en el nudo P, las que entran en el nudo Q y las ramas del camino simple que unen los nudos P y Q y que no pasan por el nudo que alimenta al lazo.

Una vez obtenidas las ramas candidatas la selección de la rama a abrir se hará al igual que en el algoritmo M-02, es decir, se abrirá cada una de las ramas candidatas y seleccionará la que produzca menores pérdidas.

Este algoritmo no funciona para redes con múltiples nudos Q en un lazo, dado que no es posible asociar los nudos Q creados por los nudos que poseen cargas capacitivas.

El pseudocódigo del algoritmo es el siguiente:

1. Inicializar la lista de ramas abiertas: $RAMAS_ABIERTAS = []$.
2. Resolver la red abriendo las ramas de la lista $RAMAS_ABIERTAS$ y crear una lista con los nudos P y otra lista con los nudos Q: $NUDOS_P$ y $NUDOS_Q$.
3. Crear el conjunto de pares de nudos P y Q pertenecientes al mismo lazo: $PARES_PQ$.
4. Seleccionar del conjunto $PARES_PQ$, el par de nudos P y Q que posea mayor tensión, siendo la tensión del par la media de las tensiones de los nudos P y Q: PAR_PQ_{MAX} .
5. Seleccionar como ramas candidatas ($CANDIDATAS$), las ramas entrantes en el nudo P de PAR_PQ_{MAX} , las ramas entrante en el nudo Q de PAR_PQ_{MAX} y las ramas del camino que une los nudos P y Q que no pasa por el nudo que alimenta al lazo.
6. Para cada rama(j) de $CANDIDATAS$:
 - a) Abrir la rama(j) junto con $RAMAS_ABIERTAS$ y resolver la red.
 - b) Calcular las pérdidas y almacenarlas en $P(j)$.
7. Seleccionar como rama a abrir ($RAMA_A_ABRIR$), la rama de entre $CANDIDATAS$ que posea las menores pérdidas de P.
8. Actualizar $RAMAS_ABIERTAS = [RAMAS_ABIERTAS, RAMA_A_ABRIR]$.
9. Si la longitud de la lista $RAMAS_ABIERTAS$ es menor al número de enlaces de la red volver al paso 2.
10. $SOLUCION = RAMAS_ABIERTAS$.

4.1.13 Algoritmo mallado M-04 iterativo

En este algoritmo se realizan tantas pasadas del algoritmo M-04 como enlaces o bucles posee la red. En cada pasada se elige como rama definitiva a abrir la última que se abrió en el algoritmo M-04 y se vuelve a realizar tantas iteraciones como enlaces o bucles posee la red.

El pseudocódigo del algoritmo es el siguiente:

1. Inicializar la lista: RAMAS_DEFINITIVAS = [].
2. Inicializar la lista de ramas abiertas: RAMAS_ABIERTAS = [].
 - a) Resolver la red abriendo las ramas de la lista RAMAS_ABIERTAS y crear una lista con los nudos P y otra lista con los nudos Q: NUDOS_P y NUDOS_Q.
 - b) Crear el conjunto de pares de nudos P y Q pertenecientes al mismo lazo: PARES_PQ.
 - c) Seleccionar del conjunto PARES_PQ, el par de nudos P y Q que posea mayor tensión, siendo la tensión del par la media de las tensiones de los nudos P y Q: PAR_PQ_{MAX} .
 - d) Seleccionar como ramas candidatas (CANDIDATAS), las ramas entrantes en el nudo P de PAR_PQ_{MAX} , las ramas entrante en el nudo Q de PAR_PQ_{MAX} y las ramas del camino que une los nudos P y Q que no pasa por el nudo que alimenta al lazo.
 - e) Para cada rama(j) de CANDIDATAS:
 - Abrir la rama(j) junto con RAMAS_ABIERTAS y resolver la red.
 - Calcular las pérdidas y almacenarlas en P(j).
 - f) Seleccionar como rama a abrir (RAMA_A_ABRIR), la rama de entre CANDIDATAS que posea las menores pérdidas de P.
 - g) Actualizar RAMAS_ABIERTAS = [RAMAS_ABIERTAS, RAMA_A_ABRIR].
 - h) Actualizar la última rama abierta: ULTIMA = RAMA_A_ABRIR.
 - i) Si la longitud de la lista RAMAS_ABIERTAS es menor que el número de enlaces de la red, volver al paso 2a.
3. Actualizar RAMAS_DEFINITIVAS = [RAMAS_DEFINITIVAS, ULTIMA].
4. Si la longitud de RAMAS_DEFINITIVAS es menor al número de enlaces de la red, actualizar RAMAS_ABIERTAS = RAMAS_DEFINITIVAS y volver al paso 2a.
5. SOLUCION = RAMAS_DEFINITIVAS.

4.2 Algoritmos radiales

A diferencia de los algoritmos que comienzan con la red mallada, los algoritmos radiales comienzan con una red radial, generalmente; el estado en el que se está operando la red.

La estructura general de los algoritmos radiales (apartado 2.5.2), es seleccionar una de las ramas que se encuentran abiertas, cerrarla, y seleccionar una rama de entre las candidatas de dicho lazo como rama a abrir.

Dado que todos los algoritmos propuestos comparten la misma estructura, a continuación se describe dicha estructura, para luego indicar en cada algoritmo su propia particularidad.

La estructura general de los algoritmos radiales es la siguiente:

1. Partiendo de una lista de las ramas abiertas, se cierra una rama para formar un bucle. Para dicho bucle se obtiene el nudo de ruptura y se prueba con cada una de las ramas del conjunto de ramas candidatas, es decir, se resuelve la red y se calculan las pérdidas para cada rama abierta. Se selecciona como rama a abrir la que produzca menores pérdidas.
2. Si las pérdidas obtenidas son estrictamente mayores respecto a la red de partida, es decir no hubiera reducción de pérdidas, se mantiene la solución y se vuelve a probar con la siguiente rama de la lista. Si las pérdidas son menores o iguales se actualiza la solución añadiendo la rama que ha provocado menores pérdidas al final de la lista y se vuelve a probar con la siguiente rama de la lista.
3. Cada vez que se encuentre una solución mejor, se inicializa el número de iteraciones a cero. En caso contrario se incrementa el número de iteraciones en una unidad. Cuando el número de iteraciones sea igual al número de eslabones de la red se finaliza el algoritmo. En realidad, el número de iteraciones contabiliza el número de soluciones consecutivas idénticas.

Es de notar que el criterio de paro propuesto obtiene la solución en la iteración $n-l$, siendo n la última iteración y l el número de lazos de la red. Bien se podría haber optado por un criterio de paro, el cual hubiese sido parar cuando no se consigue una reducción de pérdidas en el intercambio de rama propuesto. El inconveniente en este caso es que aunque en algunos casos podría alcanzar la misma solución en un número de pasos menor, en otros, alcanzaría una solución peor. En realidad, depende de la red en cuestión.

En la Tabla 5 se resumen los diferentes algoritmos radiales implementados para resolver el problema de reconfiguración de redes. En concreto, se han realizado dos algoritmos radiales, así como dos variantes aplicables a cada uno de ellos.

Tabla 5 Algoritmos radiales

Algoritmo	Nudos de ruptura	Descripción
R-01	PQ	Búsqueda de entre las dos ramas candidatas entrantes al nudo de ruptura sin orden preestablecido.
		Var. 1 Búsqueda de entre las dos ramas candidatas entrantes al nudo de ruptura seleccionando primero el lazo con mayor diferencia de tensión entre los nudos de la rama abierta que define el lazo.
		Var. 2 Búsqueda de entre las dos ramas candidatas entrantes al nudo de ruptura sin orden preestablecido. Una vez obtenida la solución se prueba el intercambio de ramas con las ramas alternativas de cada nudo de ruptura desechadas en el paso anterior.
R-02	P y Q	Búsqueda de entre las ramas candidatas correspondientes a los nudos P y Q sin orden preestablecido.
		Var. 1 Búsqueda de entre las ramas candidatas correspondientes a los nudos P y Q, seleccionando primero el lazo con mayor diferencia de tensión entre los nudos de la rama abierta que define el lazo.
		Var. 2 Búsqueda de entre las ramas candidatas correspondientes a los nudos P y Q. Una vez obtenida la solución se prueba el intercambio de ramas con las ramas alternativas de cada nudo de ruptura desechadas en el paso anterior.

4.2.1 Algoritmo radial R-01

En este algoritmo se hace uso de los nudos de ruptura PQ. El conjunto de ramas candidatas para cada lazo, corresponde con las dos ramas entrantes al nudo de ruptura PQ. Se elige la rama tal que al abrirla produce las menores pérdidas. En este algoritmo no se establece un orden para ir abordando los lazos, sino que este orden es arbitrario.

El pseudocódigo del algoritmo es el siguiente:

1. Inicializar la lista de ramas abiertas: RAMAS_ABIERTAS = red radial de partida.
2. Resolver la red abriendo las ramas de la lista RAMAS_ABIERTAS y calcular las pérdidas. Inicializar $P_{\text{ópt}}$ = pérdidas.
3. Cerrar la primera rama de la lista creando un lazo: RAMAS_ABIERTAS(1).
4. Obtener el nudo PQ del lazo y seleccionar como ramas candidatas (CANDIDATAS), las ramas entrantes en el nudo PQ.
5. Para cada rama(j) de la lista CANDIDATAS:
 - a) Abrir la rama(j) junto con RAMAS_ABIERTAS a excepción de la primera rama de la lista y resolver la red.
 - b) Calcular las pérdidas y almacenarlas en $P(j)$.
6. Seleccionar como rama a abrir (RAMA_A_ABRIR), la rama de entre CANDIDATAS que posea las menores pérdidas de P ($P_{\text{mín}}$).
7. Si $P_{\text{mín}} < P_{\text{ópt}}$,
 - a) Actualizar la lista RAMAS_ABIERTAS, formada por RAMAS_ABIERTAS a excepción de la primera rama de lista y añadir al final de la lista RAMA_A_ABRIR.
 - b) $P_{\text{ópt}} = P_{\text{mín}}$.
 - c) ITERACIONES = 0.
8. Si $P_{\text{mín}} = P_{\text{ópt}}$,
 - a) Actualizar la lista RAMAS_ABIERTAS, formada por RAMAS_ABIERTAS a excepción de la primera rama de lista y añadir al final de la lista RAMA_A_ABRIR.
 - b) ITERACIONES = ITERACIONES + 1.
9. Si $P_{\text{mín}} > P_{\text{ópt}}$,
 - a) Actualizar la lista RAMAS_ABIERTAS, formada por RAMAS_ABIERTAS a excepción de la primera rama de lista que se añade al final de la lista RAMA_A_ABRIR.
 - b) ITERACIONES = ITERACIONES + 1.
10. Si ITERACIONES es menor al número de enlaces de la red volver al paso 3.
11. SOLUCION = RAMAS_ABIERTAS.

4.2.2 Algoritmo radial R-02

En este algoritmo se hace uso de los nudos de ruptura P y Q. El conjunto de ramas candidatas para cada lazo, corresponde con la unión de las ramas entrantes en el nudo P, las entrantes en el nudo Q y las ramas del camino que une el nudo P con el nudo Q y que no pase por el nudo que alimenta al lazo dos ramas entrantes al nudo de ruptura PQ. Se elige la rama tal que al abrirla produce las menores pérdidas. En este algoritmo no se establece un orden para ir abordando los lazos, sino que este orden es arbitrario.

El pseudocódigo del algoritmo es el siguiente:

1. Inicializar la lista de ramas abiertas: RAMAS_ABIERTAS = red radial de partida.
2. Resolver la red abriendo las ramas de la lista RAMAS_ABIERTAS y calcular las pérdidas. Inicializar $P_{\text{ópt}}$ = pérdidas.
3. Cerrar la primera rama de la lista creando un lazo: RAMAS_ABIERTAS(1).
4. Obtener el nudo P y el nudo Q del lazo y seleccionar como ramas candidatas (CANDIDATAS), la unión de las ramas entrantes en el nudo P, las ramas entrantes en el nudo Q y el conjunto de las ramas que forman el camino que une el nudo P con el nudo Q y que no pasan por el nudo que alimenta al lazo.
5. Para cada rama(j) de la lista CANDIDATAS:
 - a) Abrir la rama(j) junto con RAMAS_ABIERTAS a excepción de la primera rama de la lista y resolver la red.
 - b) Calcular las pérdidas y almacenarlas en $P(j)$.
6. Seleccionar como rama a abrir (RAMA_A_ABRIR), la rama de entre CANDIDATAS que posea las menores pérdidas de P ($P_{\text{mín}}$).
7. Si $P_{\text{mín}} < P_{\text{ópt}}$,
 - a) Actualizar la lista RAMAS_ABIERTAS, formada por RAMAS_ABIERTAS a excepción de la primera rama de lista y añadir al final de la lista RAMA_A_ABRIR.
 - b) $P_{\text{ópt}} = P_{\text{mín}}$.
 - c) ITERACIONES = 0.
8. Si $P_{\text{mín}} = P_{\text{ópt}}$,
 - a) Actualizar la lista RAMAS_ABIERTAS, formada por RAMAS_ABIERTAS a excepción de la primera rama de lista y añadir al final de la lista RAMA_A_ABRIR.
 - b) ITERACIONES = ITERACIONES + 1.
9. Si $P_{\text{mín}} > P_{\text{ópt}}$,
 - a) Actualizar la lista RAMAS_ABIERTAS, formada por RAMAS_ABIERTAS a excepción de la primera rama de lista que se añade al final de la lista RAMA_A_ABRIR.
 - b) ITERACIONES = ITERACIONES + 1.
10. Si ITERACIONES es menor al número de enlaces de la red volver al paso 3.
11. SOLUCION = RAMAS_ABIERTAS.

4.2.3 Algoritmos radiales R-01 y R-02 variante 1

Son variantes del R-01 y R-02 donde se establece un orden para seleccionar los lazos. En esta variante, para cada lazo definido por la rama abierta del árbol se calcula la diferencia de tensión entre los nudos de dicha rama abierta. Se empieza en primer lugar por el lazo que posea mayor diferencia de tensión y así sucesivamente.

El pseudocódigo del algoritmo es el siguiente:

1. Inicializar la lista de ramas abiertas: RAMAS_ABIERTAS = red radial de partida.
2. Resolver la red abriendo las ramas de la lista RAMAS_ABIERTAS y calcular las pérdidas. Inicializar $P_{\text{ópt}}$ = pérdidas.
3. Ordenar RAMAS_ABIERTAS por máxima diferencia de tensión entre sus nudos.
4. Cerrar la primera rama de la lista creando un lazo: RAMAS_ABIERTAS(1).
5. **Algoritmo R-01:** Obtener el nudo PQ del lazo y seleccionar como ramas candidatas (CANDIDATAS), las ramas entrantes en el nudo PQ.
Algoritmo R-02: Obtener el nudo P y el nudo Q del lazo y seleccionar como ramas candidatas (CANDIDATAS), la unión de las ramas entrantes en el nudo P, las ramas entrantes en el nudo Q y el conjunto de las ramas que forman el camino que une el nudo P con el nudo Q y que no pasan por el nudo que alimenta al lazo.
6. Para cada rama(j) de la lista CANDIDATAS:
 - a) Abrir la rama(j) junto con RAMAS_ABIERTAS a excepción de la primera rama de la lista y resolver la red.
 - b) Calcular las pérdidas y almacenarlas en P(j).
7. Seleccionar como rama a abrir (RAMA_A_ABRIR), la rama de entre CANDIDATAS que posea las menores pérdidas de P ($P_{\text{mín}}$).
8. Si $P_{\text{mín}} < P_{\text{ópt}}$,
 - a) Actualizar la lista RAMAS_ABIERTAS, formada por RAMAS_ABIERTAS a excepción de la primera rama de lista y añadir al final de la lista RAMA_A_ABRIR.
 - b) $P_{\text{ópt}} = P_{\text{mín}}$.
 - c) ITERACIONES = 0.
9. Si $P_{\text{mín}} = P_{\text{ópt}}$,
 - a) Actualizar la lista RAMAS_ABIERTAS, formada por RAMAS_ABIERTAS a excepción de la primera rama de lista y añadir al final de la lista RAMA_A_ABRIR.
 - b) ITERACIONES = ITERACIONES + 1.
10. Si $P_{\text{mín}} > P_{\text{ópt}}$,
 - a) Actualizar la lista RAMAS_ABIERTAS, formada por RAMAS_ABIERTAS a excepción de la primera rama de lista que se añade al final de la lista RAMA_A_ABRIR.
 - b) ITERACIONES = ITERACIONES + 1.
11. Si ITERACIONES es menor al número de enlaces de la red volver al paso 4.
12. SOLUCION = RAMAS_ABIERTAS.

4.2.4 Algoritmos radiales R-01 y R-02 variante 2

Teniendo en cuenta que en un algoritmo radial cada vez que se produce un intercambio de ramas los flujos de potencia cambian, se ha intentado no descartar las peores opciones de las ramas candidatas. Para ello, cada vez que se realiza un intercambio de ramas se guardan como ramas alternativas el resto de las ramas candidatas. Una vez completado el algoritmo principal (R-01 ó R-02), se realiza una segunda fase donde para cada lazo se prueba con la rama candidata alternativa a la que se seleccionó.

El pseudocódigo del algoritmo es el siguiente:

1. Inicializar la lista de ramas abiertas: RAMAS_ABIERTAS_I = red radial de partida.
2. Resolver la red abriendo las ramas de la lista RAMAS_ABIERTAS_I y calcular las pérdidas. Inicializar $P_{\text{ópt}} = \text{pérdidas}$.
3. Cerrar la primera rama de la lista creando un lazo: RAMAS_ABIERTAS_I(1).
4. **Algoritmo R-01:** Obtener el nudo PQ del lazo y seleccionar como ramas candidatas (CANDIDATAS), las ramas entrantes en el nudo PQ.
Algoritmo R-02: Obtener el nudo P y el nudo Q del lazo y seleccionar como ramas candidatas (CANDIDATAS), la unión de las ramas entrantes en el nudo P, las ramas entrantes en el nudo Q y el conjunto de las ramas que forman el camino que une el nudo P con el nudo Q y que no pasan por el nudo que alimenta al lazo.
5. Para cada rama(j) de la lista CANDIDATAS:
 - a) Abrir la rama(j) junto con RAMAS_ABIERTAS_I a excepción de la primera rama de la lista y resolver la red.
 - b) Calcular las pérdidas y almacenarlas en P(j).
6. Seleccionar como rama a abrir (RAMA_A_ABRIR), la rama de entre CANDIDATAS que posea las menores pérdidas de P ($P_{\text{mín}}$).
7. Guarda en TABLA las ramas alternativas a la RAMA_A_ABRIR, junto con la RAMA_A_ABRIR.
8. Si $P_{\text{mín}} < P_{\text{ópt}}$,
 - a) Actualizar la lista RAMAS_ABIERTAS_I, formada por RAMAS_ABIERTAS_I a excepción de la primera rama de lista y añadir al final de la lista RAMA_A_ABRIR.
 - b) $P_{\text{ópt}} = P_{\text{mín}}$.
 - c) ITERACIONES = 0.
9. Si $P_{\text{mín}} = P_{\text{ópt}}$,
 - a) Actualizar la lista RAMAS_ABIERTAS_I, formada por RAMAS_ABIERTAS_I a excepción de la primera rama de lista y añadir al final de la lista RAMA_A_ABRIR.
 - b) ITERACIONES = ITERACIONES + 1.
10. Si $P_{\text{mín}} > P_{\text{ópt}}$,
 - a) Actualizar la lista RAMAS_ABIERTAS_I, formada por RAMAS_ABIERTAS_I a excepción de la primera rama de lista que se añade al final de la lista RAMA_A_ABRIR.
 - b) ITERACIONES = ITERACIONES + 1.
11. Si ITERACIONES es menor al número de enlaces de la red volver al paso 3.

12. Inicializar $RAMAS_ABIERTAS_2 = RAMAS_ABIERTAS_1$.
13. Para cada rama(j) de $RAMAS_ABIERTAS_1$:
 - a) Se busca en TABLA las $RAMA_ALTERNATIVA$ a rama(j) si se encuentra tabulada rama(j), si no, se continúa con la siguiente rama de $RAMAS_ABIERTAS_1$.
 - b) Se actualiza $RAMAS_ABIERTAS_2(j) = RAMA_ALTERNATIVA$.
 - c) Se resuelve la red abriendo las ramas $RAMAS_ABIERTAS_2$ y se calculan las nuevas pérdidas (P_alter).
 - d) Si las pérdidas (P_alter) son menores a las pérdidas actuales $P_ópt$, se actualiza $P_ópt = P_alter$, si no, se restituye en $RAMAS_ABIERTAS_2$ rama(j), es decir, $RAMAS_ABIERTAS_2(j) = rama(j)$.
14. $SOLUCION = RAMAS_ABIERTAS_2$.

4.3 Algoritmo radiales en serie

Con el objeto de intentar mejorar la solución de los algoritmos radiales, se han realizado pruebas usando la solución de uno de ellos como solución de partida del siguiente. La combinación más prometedora ha sido R01-R02.

4.4 Algoritmos híbridos

Como algoritmos híbridos se han considerado aquellos algoritmos que están compuestos por un algoritmo mallado con el objeto de crear una solución de partida para luego ser utilizada en un algoritmo radial.

No se han utilizado las versiones denominadas iterativas de los algoritmos mallados, sino que se han utilizado las ocho posibles combinaciones entre los algoritmos mallados M-01, M-02, M-03 y M-04 y los algoritmos radiales R-01 y R-02.

4.5 Algoritmos híbridos con reinicio

A diferencia de los algoritmos híbridos, se plantea una nueva combinación consistente en que cada vez que el algoritmo radial encuentre una solución mejor que la obtenida en el algoritmo mallado, vuelva a reiniciar el algoritmo mallado, manteniendo abiertas un conjunto de ramas. De esta forma se permite que el algoritmo mallado encuentre diferentes nudos de ruptura, en función del nuevo patrón de flujos por las líneas.

Al igual que en los algoritmos híbridos, se han planteado las mismas combinaciones, es decir los cuatro algoritmos mallados (M-01, M-02, M-03 y M-04) con los dos algoritmos radiales (R-01 y R-02).

Capítulo 5

MÉTODOS DE RESOLUCIÓN DE LOS REPARTOS DE CARGA

Un aspecto importante en el problema de reconfiguración de redes es el método de resolución de los repartos de carga. Para decidir, independientemente del algoritmo de reconfiguración de redes, entre las diferentes opciones es necesario resolver la red eléctrica y obtener las pérdidas de la misma.

Para la resolución de los repartos de carga, tanto para la obtención de los nudos de ruptura, como para evaluar las pérdidas se ha utilizado el método de Newton-Raphson. En la librería de MATPOWER, se incluye este método, el cual, comparado con otros programas comerciales, como por ejemplo PowerWorld, arrojan los mismos resultados en cuanto a precisión.

El método de Newton-Raphson, para una tolerancia de 10^{-8} , necesita entre 3 y 4 iteraciones para las redes utilizadas en este trabajo. Con el objeto de disminuir el tiempo de computación de los algoritmos, se ha estudiado el comportamiento de los algoritmos frente a otros métodos, que en realidad son aproximaciones de las ecuaciones de la red.

En redes de distribución, la resolución del problema de reparto de cargas sólo posee nudos PQ, más el nudo de alimentación o slack. Las ecuaciones utilizadas para la resolución del problema de reparto de cargas, provienen de plantear la ecuación nodal a cada nudo de la red menos al nudo slack, del que se conoce su tensión. La ecuación (37) expresa la ecuación nodal para un nudo genérico i de la red.

$$\frac{\bar{S}_i^*}{U_i^*} + \sum_{j=1}^n Y_{ij} U_j = 0 \quad (37)$$

Generalmente, dado que en el problema del reparto de carga se especifican las cargas en cada uno de los nudos, la ecuación (37) se multiplica por el conjugado de la tensión del nudo al que se está planteando la ecuación nodal —nudo i — con el objeto de tener las potencias separadas y así poder compararlas con las especificadas. Tras dicha operación, las ecuaciones del sistema corresponden con (38).

$$\bar{S}_i^* + U_i^* \sum_{j=1}^n Y_{ij} U_j = 0 \quad (38)$$

En el sistema de ecuaciones no lineales formado por ambas ecuaciones, (37) y (38), las variables que intervienen son:

- $\bar{S}_i$ Potencia compleja de la carga en el nudo i
- U_i, U_j Tensiones complejas de los nudos i y j , respectivamente
- Y_{ij} Admitancia compleja entre el nudo i y el nudo j .
Elemento i, j de la matriz admitancia de nudos.

Al método de Newton-Raphson obtenido al resolver el sistema de ecuaciones (38) se le denomina en la literatura técnica [62] como método de desajuste de potencias, mientras que al método que se obtiene al resolver el sistema de ecuaciones (37), se le denomina método de desajuste de corrientes.

A continuación se analizan los dos sistemas de ecuaciones, desajuste de potencias y desajuste de corrientes. Es importante tener presente que los métodos a analizar en los siguientes apartados están sujetos a las siguientes condiciones en el modelado de las redes de distribución:

- Redes con nudos PQ y slack, sin nudos PV.
- Las líneas se modelan por impedancias en serie.
- No existen impedancias entre los nudos y el nudo de referencia.

5.1 Método de desajuste de potencias

Como se ha mencionado anteriormente, éstas son las ecuaciones generalmente utilizadas para resolver el reparto de carga por el método de Newton-Raphson. Separando la ecuación (38) en su parte real e imaginaria, se obtiene para cada nudo i de la red las siguientes ecuaciones:

$$f_i^{re} = P_i + \sum_{j=1}^n Y_{ij}^{re} (U_i^{re} U_j^{re} + U_i^{im} U_j^{im}) - \sum_{j=1}^n Y_{ij}^{im} (U_i^{re} U_j^{im} - U_i^{im} U_j^{re}) \quad (39)$$

$$f_i^{im} = -Q_i + \sum_{j=1}^n Y_{ij}^{im} (U_i^{re} U_j^{re} + U_i^{im} U_j^{im}) + \sum_{j=1}^n Y_{ij}^{re} (U_i^{re} U_j^{im} - U_i^{im} U_j^{re}) \quad (40)$$

Tomando el primer término de la serie de Taylor en torno al punto de equilibrio correspondiente a un perfil plano de tensiones, las ecuaciones anteriores se aproximan por:

$$\begin{bmatrix} \bar{f}_i^{re} \\ \bar{f}_i^{im} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_i^{re} \big|_0 \\ f_i^{im} \big|_0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{\partial f_i^{re}}{\partial U_j^{re}} \big|_0 & \frac{\partial f_i^{re}}{\partial U_j^{im}} \big|_0 \\ \frac{\partial f_i^{im}}{\partial U_j^{re}} \big|_0 & \frac{\partial f_i^{im}}{\partial U_j^{im}} \big|_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_j^{re} - U_j^{re} \big|_0 \\ U_j^{im} - U_j^{im} \big|_0 \end{bmatrix} = 0 \quad (41)$$

El superíndice re indica parte real y el superíndice im indica parte imaginaria.

Derivando con respecto a cada variable las ecuaciones (39) y (40), se han obtenido los elementos de la matriz Jacobiana. En las ecuaciones (42) a (45) se desarrollan dichos términos.

$$\frac{\partial f_i^{re}}{\partial U_j^{re}} = \begin{cases} Y_{ii}^{re} U_i^{re} + \sum_{j=1}^n Y_{ij}^{re} U_j^{re} - \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n Y_{ij}^{im} U_j^{im} & si \quad i = j \\ Y_{ij}^{re} U_i^{re} + Y_{ij}^{im} U_i^{im} & si \quad i \neq j \end{cases} \quad (42)$$

$$\frac{\partial f_i^{re}}{\partial U_j^{im}} = \begin{cases} Y_{ii}^{re} U_i^{im} + \sum_{j=1}^n Y_{ij}^{re} U_j^{im} + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n Y_{ij}^{im} U_j^{re} & si \quad i = j \\ Y_{ij}^{re} U_i^{im} - Y_{ij}^{im} U_i^{re} & si \quad i \neq j \end{cases} \quad (43)$$

$$\frac{\partial f_i^{im}}{\partial U_j^{re}} = \begin{cases} Y_{ii}^{im} U_i^{re} + \sum_{j=1}^n Y_{ij}^{im} U_j^{re} + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n Y_{ij}^{re} U_j^{im} & si \quad i = j \\ Y_{ij}^{im} U_i^{re} - Y_{ij}^{re} U_i^{im} & si \quad i \neq j \end{cases} \quad (44)$$

$$\frac{\partial f_i^{im}}{\partial U_j^{im}} = \begin{cases} Y_{ii}^{im} U_i^{im} + \sum_{j=1}^n Y_{ij}^{im} U_j^{im} - \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n Y_{ij}^{re} U_j^{re} & si \quad i = j \\ Y_{ij}^{re} U_i^{im} - Y_{ij}^{im} U_i^{re} & si \quad i \neq j \end{cases} \quad (45)$$

Del sistema de ecuaciones lineales (41), se eliminan las ecuaciones (real e imaginaria) correspondientes al nudo slack. Por tanto, el sistema de ecuaciones a resolver será, para una red de n nudos: $2 \cdot (n-1)$. De la matriz Jacobiana se eliminarán las dos filas correspondientes al nudo slack (real e imaginaria). Dado que la tensión del nudo slack está impuesta, se deben separar las columnas de la matriz Jacobiana correspondientes al nudo slack. De esta forma el sistema de ecuaciones resultante es el siguiente:

$$\begin{bmatrix} f_i^{re} \\ f_i^{im} \end{bmatrix}_{\substack{i \neq s \\ 0}}^{2(n-1) \times 1} + \begin{bmatrix} \frac{\partial f_i^{re}}{\partial U_j^{re}} \\ \frac{\partial f_i^{im}}{\partial U_j^{re}} \end{bmatrix}_{\substack{i \neq s \\ j \neq s \\ 0}}^{2(n-1) \times 2(n-1)} \begin{bmatrix} U_j^{re} - U_j^{re} \\ U_j^{im} - U_j^{im} \end{bmatrix}_{\substack{j \neq s \\ j \neq s \\ 0}}^{2(n-1) \times 1} + \begin{bmatrix} \frac{\partial f_i^{re}}{\partial U_s^{re}} \\ \frac{\partial f_i^{im}}{\partial U_s^{re}} \end{bmatrix}_{\substack{i \neq s \\ 0}}^{2(n-1) \times 2} \begin{bmatrix} 1 - U_s^{re} \\ 0 - U_s^{im} \end{bmatrix}_{\substack{0 \\ 0}}^{2 \times 1} = 0 \quad (46)$$

Particularizando para un perfil plano de tensiones ($1+j0$), el sistema de ecuaciones a resolver para la primera iteración del método de Newton-Raphson resulta:

$$\begin{aligned}
& \begin{bmatrix} f_i^{re} \\ \vdots \\ f_i^{im} \\ \vdots \\ f_i^{re} \\ \vdots \\ f_i^{im} \end{bmatrix}_{\substack{i \neq s \\ 0 \\ i \neq s \\ 0}}^{2(n-1) \times 1} + \begin{bmatrix} \frac{\partial f_i^{re}}{\partial U_j^{re}} & \frac{\partial f_i^{re}}{\partial U_j^{im}} \\ \vdots & \vdots \\ \frac{\partial f_i^{im}}{\partial U_j^{re}} & \frac{\partial f_i^{im}}{\partial U_j^{im}} \end{bmatrix}_{\substack{j \neq s \\ 0 \\ j \neq s \\ 0}}^{2(n-1) \times 2(n-1)} \begin{bmatrix} U_j^{re} - 1 \\ U_j^{im} - 0 \end{bmatrix}_{\substack{j \neq s \\ 0 \\ j \neq s \\ 0}}^{2(n-1) \times 1} + \begin{bmatrix} \frac{\partial f_i^{re}}{\partial U_s^{re}} & \frac{\partial f_i^{re}}{\partial U_s^{im}} \\ \vdots & \vdots \\ \frac{\partial f_i^{im}}{\partial U_s^{re}} & \frac{\partial f_i^{im}}{\partial U_s^{im}} \end{bmatrix}_{\substack{i \neq s \\ 0 \\ i \neq s \\ 0}}^{2(n-1) \times 2} \begin{bmatrix} 1 - 1 \\ 0 - 0 \end{bmatrix}_{\substack{1-1 \\ 0-0}}^{2 \times 1} = 0 \quad (47)
\end{aligned}$$

La evaluación de las expresiones (39), (40), (42), (43), (44) y (45) para un perfil plano de tensiones $(1+j0)$, y teniendo en cuenta que la suma por filas de la matriz de admitancias completa es nula, da como resultado las siguientes expresiones:

$$f_i^{re} \Big|_{1+j0} = P_i + \sum_{j=1}^n Y_{ij}^{re} = P_i \quad (48)$$

$$f_i^{im} \Big|_{1+j0} = -Q_i + \sum_{j=1}^n Y_{ij}^{im} = -Q_i \quad (49)$$

$$\frac{\partial f_i^{re}}{\partial U_j^{re}} \Big|_{1+j0} = \begin{cases} Y_{ii}^{re} + \sum_{j=1}^n Y_{ij}^{re} & si \quad i = j \\ Y_{ij}^{re} & si \quad i \neq j \end{cases} = Y_{ij}^{re} \quad (50)$$

$$\frac{\partial f_i^{re}}{\partial U_j^{im}} \Big|_{1+j0} = \begin{cases} -Y_{ii}^{im} + \sum_{j=1}^n Y_{ij}^{im} & si \quad i = j \\ -Y_{ij}^{im} & si \quad i \neq j \end{cases} = -Y_{ij}^{im} \quad (51)$$

$$\frac{\partial f_i^{im}}{\partial U_j^{re}} \Big|_{1+j0} = \begin{cases} Y_{ii}^{im} + \sum_{j=1}^n Y_{ij}^{im} & si \quad i = j \\ Y_{ij}^{im} & si \quad i \neq j \end{cases} = Y_{ij}^{im} \quad (52)$$

$$\frac{\partial f_i^{im}}{\partial U_j^{im}} \Big|_{1+j0} = \begin{cases} Y_{ii}^{re} - \sum_{j=1}^n Y_{ij}^{re} & si \quad i = j \\ Y_{ij}^{re} & si \quad i \neq j \end{cases} = Y_{ij}^{re} \quad (53)$$

Sustituyendo las expresiones (48) a (53) en la ecuación (47) resulta:

$$\begin{bmatrix} P_i \\ \vdots \\ -Q_i \\ \vdots \end{bmatrix}_{\substack{i \neq s \\ i \neq s}} + \begin{bmatrix} Y_{ij}^{re} & -Y_{ij}^{im} \\ Y_{ij}^{im} & Y_{ij}^{re} \end{bmatrix}_{\substack{i, j \neq s \\ i, j \neq s}} \begin{bmatrix} U_i^{re} \\ U_i^{im} \end{bmatrix}_{\substack{i \neq s \\ i \neq s}} - \begin{bmatrix} \sum_{j \neq s} Y_{ij}^{re} \\ \sum_{j \neq s} Y_{ij}^{im} \end{bmatrix} = 0 \quad (54)$$

Donde:

Y_{ij}^{re} $i, j \neq s$	Matriz cuadrada de orden $n-1$, formada por la parte real de la matriz admitancia de nudos donde se ha eliminado la fila y columna del nudo slack.
Y_{ij}^{im} $i, j \neq s$	Matriz cuadrada de orden $n-1$, formada por la parte imaginaria de la matriz admitancia de nudos donde se ha eliminado la fila y columna del nudo slack
U_i^{re} $i \neq s$	Vector de orden $n-1$, formado por la parte real de las tensiones de los nudos eliminada la fila correspondiente al nudo slack.
U_i^{im} $i \neq s$	Vector de orden $n-1$, formado por la parte imaginaria de las tensiones de los nudos eliminada la fila correspondiente al nudo slack

P_i Matriz diagonal de orden $n-1$, donde los elementos de la diagonal son las potencias activas de las cargas de los nudos donde se han eliminado la fila y la columna del nudo slack.

Q_i Matriz diagonal de orden $n-1$, donde los elementos de la diagonal son las potencias reactivas de las cargas de los nudos donde se han eliminado la fila y la columna del nudo slack.

Reordenando términos en (54), se obtiene:

$$\begin{bmatrix} -P_i - Y_{is}^{re} \\ Q_i - Y_{is}^{im} \end{bmatrix}_{i \neq s} = \begin{bmatrix} Y_{ij}^{re} & -Y_{ij}^{im} \\ Y_{ij}^{im} & Y_{ij}^{re} \end{bmatrix}_{i,j \neq s} \begin{bmatrix} U_i^{re} \\ U_i^{im} \end{bmatrix}_{i \neq s} \quad (55)$$

La ecuación (55) se puede expresar en forma compleja. La ecuación para cada nudo de la red menos el nudo slack sería (56). Esta aproximación es la comúnmente utilizada, donde la carga en cada uno de los nudos es modelada por una fuente de corriente, tomando como referencia para el cálculo de dichas corrientes un perfil plano de tensiones.

$$-\bar{S}_i^* - \bar{Y}_{is} = \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq s}}^n \bar{Y}_{ij} \bar{U}_j \quad (56)$$

Este sistema de ecuaciones es lineal y de orden $n-1$.

5.2 Método de desajuste de corrientes

En este caso, se linealizan las ecuaciones resultantes de aplicar la ecuación nodal a cada nudo, es decir, la ecuación (37) para cada nudo de la red menos el nudo slack. Procediendo de igual manera al apartado anterior, separando parte real e imaginaria, se tiene:

$$f_i^{re} = \frac{P_i U_i^{re} + Q_i U_i^{im}}{U_i^{re2} + U_i^{im2}} + \sum_{j=1}^n Y_{ij}^{re} U_j^{re} - \sum_{j=1}^n Y_{ij}^{im} U_j^{im} \quad (57)$$

$$f_i^{im} = \frac{P_i U_i^{im} - Q_i U_i^{re}}{U_i^{re2} + U_i^{im2}} + \sum_{j=1}^n Y_{ij}^{re} U_j^{im} + \sum_{j=1}^n Y_{ij}^{im} U_j^{re} \quad (58)$$

Tomando el primer término de la serie de Taylor en torno al punto de equilibrio correspondiente a un perfil plano de tensiones, las ecuaciones anteriores se aproximan por:

$$\begin{bmatrix} f_i^{re} \\ f_i^{im} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_i^{re} \\ f_i^{im} \end{bmatrix}_0 + \begin{bmatrix} \left. \frac{\partial f_i^{re}}{\partial U_j^{re}} \right|_0 & \left. \frac{\partial f_i^{re}}{\partial U_j^{im}} \right|_0 \\ \left. \frac{\partial f_i^{im}}{\partial U_j^{re}} \right|_0 & \left. \frac{\partial f_i^{im}}{\partial U_j^{im}} \right|_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_j^{re} - U_j^{re}|_0 \\ U_j^{im} - U_j^{im}|_0 \end{bmatrix} = 0 \quad (59)$$

Derivando con respecto a cada variable las ecuaciones (57) y (58) se obtienen los elementos de la matriz Jacobiana. En las ecuaciones (60) a (63) se desarrollan dichos términos.

$$\frac{\partial f_i^{re}}{\partial U_j^{re}} = \begin{cases} \frac{P_i(U_i^{re2} + U_i^{im2}) - 2U_i^{re}(P_i U_i^{re} + Q_i U_i^{im})}{(U_i^{re2} + U_i^{im2})^2} + Y_{ii}^{re} & si \quad i = j \\ Y_{ij}^{re} & si \quad i \neq j \end{cases} \quad (60)$$

$$\frac{\partial f_i^{re}}{\partial U_j^{im}} = \begin{cases} \frac{Q_i(U_i^{re2} + U_i^{im2}) - 2U_i^{im}(P_i U_i^{re} + Q_i U_i^{im})}{(U_i^{re2} + U_i^{im2})^2} - Y_{ii}^{im} & si \quad i = j \\ -Y_{ij}^{im} & si \quad i \neq j \end{cases} \quad (61)$$

$$\frac{\partial f_i^{im}}{\partial U_j^{re}} = \begin{cases} \frac{-Q_i(U_i^{re2} + U_i^{im2}) - 2U_i^{re}(P_i U_i^{im} - Q_i U_i^{re})}{(U_i^{re2} + U_i^{im2})^2} + Y_{ii}^{im} & si \quad i = j \\ Y_{ij}^{im} & si \quad i \neq j \end{cases} \quad (62)$$

$$\frac{\partial f_i^{im}}{\partial U_j^{im}} = \begin{cases} \frac{P_i(U_i^{re2} + U_i^{im2}) - 2U_i^{im}(P_i U_i^{im} - Q_i U_i^{re})}{(U_i^{re2} + U_i^{im2})^2} + Y_{ii}^{re} & si \quad i = j \\ Y_{ij}^{re} & si \quad i \neq j \end{cases} \quad (63)$$

Del sistema de ecuaciones lineales (59) se eliminan las ecuaciones (real e imaginaria) correspondientes al nudo slack. Una vez eliminadas, el sistema de ecuaciones a resolver será para una red de n nudos: $2 \cdot (n-1)$. Procediendo al igual que en el método de desajuste de potencias se obtienen las ecuaciones (64) y (65).

$$\begin{bmatrix} f_i^{re} \\ f_i^{im} \end{bmatrix}_{\substack{i \neq s \\ 0}} + \begin{bmatrix} \frac{\partial f_i^{re}}{\partial U_j^{re}} & \frac{\partial f_i^{re}}{\partial U_j^{im}} \\ \frac{\partial f_i^{im}}{\partial U_j^{re}} & \frac{\partial f_i^{im}}{\partial U_j^{im}} \end{bmatrix}_{\substack{j \neq s \\ 0}} \begin{bmatrix} U_j^{re} - U_j^{re} \\ U_j^{im} - U_j^{im} \end{bmatrix}_{\substack{j \neq s \\ 0}} + \begin{bmatrix} \frac{\partial f_i^{re}}{\partial U_s^{re}} & \frac{\partial f_i^{re}}{\partial U_s^{im}} \\ \frac{\partial f_i^{im}}{\partial U_s^{re}} & \frac{\partial f_i^{im}}{\partial U_s^{im}} \end{bmatrix}_{\substack{i \neq s \\ 0}} \begin{bmatrix} 1 - U_s^{re} \\ 0 - U_s^{im} \end{bmatrix}_{\substack{0 \\ 0}} = 0 \quad (64)$$

$2(n-1) \times 1 \quad 2(n-1) \times 2(n-1) \quad 2(n-1) \times 1 \quad 2(n-1) \times 2 \quad 2 \times 1$

El sistema de ecuaciones (65) corresponde con el método de Newton-Raphson de desajuste de corrientes.

$$\begin{bmatrix} f_i^{re} \\ f_i^{im} \end{bmatrix}_{\substack{i \neq s \\ 0}} + \begin{bmatrix} \frac{\partial f_i^{re}}{\partial U_j^{re}} & \frac{\partial f_i^{re}}{\partial U_j^{im}} \\ \frac{\partial f_i^{im}}{\partial U_j^{re}} & \frac{\partial f_i^{im}}{\partial U_j^{im}} \end{bmatrix}_{\substack{j \neq s \\ 0}} \begin{bmatrix} U_j^{re} - 1 \\ U_j^{im} - 0 \end{bmatrix}_{\substack{j \neq s \\ 0}} + \begin{bmatrix} \frac{\partial f_i^{re}}{\partial U_s^{re}} & \frac{\partial f_i^{re}}{\partial U_s^{im}} \\ \frac{\partial f_i^{im}}{\partial U_s^{re}} & \frac{\partial f_i^{im}}{\partial U_s^{im}} \end{bmatrix}_{\substack{i \neq s \\ 0}} \begin{bmatrix} 1 - 1 \\ 0 - 0 \end{bmatrix}_{\substack{0 \\ 0}} = 0 \quad (65)$$

$2(n-1) \times 1 \quad 2(n-1) \times 2(n-1) \quad 2(n-1) \times 1 \quad 2(n-1) \times 2 \quad 2 \times 1$

Al igual que en el apartado anterior, la suma por filas de la matriz de admitancias de la red es nula. Por tanto, bajo un perfil plano de tensiones las expresiones (57), (58), (60), (61), (62) y (63) resultan:

$$f_i^{re} \Big|_{1+j0} = P_i + \sum_{j=1}^n Y_{ij}^{re} = P_i \quad (66)$$

$$f_i^{im} \Big|_{1+j0} = -Q_i + \sum_{j=1}^n Y_{ij}^{im} = -Q_i \quad (67)$$

$$\frac{\partial f_i^{re}}{\partial U_j^{re}} \Big|_{1+j0} = \begin{cases} -P_i + Y_{ii}^{re} & si \quad i = j \\ Y_{ij}^{re} & si \quad i \neq j \end{cases} \quad (68)$$

$$\frac{\partial f_i^{re}}{\partial U_j^{im}} \Big|_{1+j0} = \begin{cases} Q_i - Y_{ii}^{im} & si \quad i = j \\ -Y_{ij}^{im} & si \quad i \neq j \end{cases} \quad (69)$$

$$\frac{\partial f_i^{im}}{\partial U_j^{re}} \Big|_{1+j0} = \begin{cases} Q_i + Y_{ii}^{im} & si \quad i = j \\ Y_{ij}^{im} & si \quad i \neq j \end{cases} \quad (70)$$

$$\frac{\partial f_i^{im}}{\partial U_j^{im}} \Big|_{1+j0} = \begin{cases} P_i + Y_{ii}^{re} & si \quad i = j \\ Y_{ij}^{re} & si \quad i \neq j \end{cases} \quad (71)$$

Sustituyendo las expresiones (66) a (71) en la ecuación (65) resulta:

$$\begin{bmatrix} P_i \\ -Q_i \end{bmatrix}_{i \neq s} + \begin{bmatrix} Y_{ij}^{re} & -Y_{ij}^{im} \\ Y_{ij}^{im} & Y_{ij}^{re} \end{bmatrix}_{i,j \neq s} \begin{bmatrix} U_i^{re} \\ U_i^{im} \end{bmatrix}_{i \neq s} + \begin{bmatrix} -P_i & Q_i \\ Q_i & P_i \end{bmatrix}_{i \neq s} \begin{bmatrix} U_i^{re} \\ U_i^{im} \end{bmatrix}_{i \neq s} - \begin{bmatrix} \sum_{j \neq s} Y_{ij}^{re} \\ \sum_{j \neq s} Y_{ij}^{im} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} -P_i \\ Q_i \end{bmatrix}_{i \neq s} = 0 \quad (72)$$

Reordenando los términos en (72), se tiene:

$$\begin{bmatrix} -2P_i - Y_{is}^{re} \\ 2Q_i - Y_{is}^{im} \end{bmatrix}_{i \neq s} = \begin{bmatrix} Y_{ij}^{re} & -Y_{ij}^{im} \\ Y_{ij}^{im} & Y_{ij}^{re} \end{bmatrix}_{i,j \neq s} \begin{bmatrix} U_i^{re} \\ U_i^{im} \end{bmatrix}_{i \neq s} + \begin{bmatrix} -P_i & Q_i \\ Q_i & P_i \end{bmatrix}_{i \neq s} \begin{bmatrix} U_i^{re} \\ U_i^{im} \end{bmatrix}_{i \neq s} \quad (73)$$

Donde:

Y_{ij}^{re} $i,j \neq s$	Matriz cuadrada de orden $n-1$, formada por la parte real de la matriz admitancia de nudos donde se ha eliminado la fila y columna del nudo slack.
Y_{ij}^{im} $i,j \neq s$	Matriz cuadrada de orden $n-1$, formada por la parte imaginaria de la matriz admitancia de nudos donde se ha eliminado la fila y columna del nudo slack
U_i^{re} $i \neq s$	Vector de orden $n-1$, formado por la parte real de las tensiones de los nudos eliminada la fila correspondiente al nudo slack.
U_i^{im} $i \neq s$	Vector de orden $n-1$, formado por la parte imaginaria de las tensiones de los nudos eliminada la fila correspondiente al nudo slack
P_i $i \neq s$	Matriz diagonal de orden $n-1$, donde los elementos de la diagonal son las potencias activas de las cargas de los nudos donde se han eliminado la fila y la columna del nudo slack.
Q_i $i \neq s$	Matriz diagonal de orden $n-1$, donde los elementos de la diagonal son las potencias reactivas de las cargas de los nudos donde se han eliminado la fila y la columna del nudo slack.

La ecuación (73) corresponde con un sistema de $2(n-1)$ ecuaciones lineales. Para su resolución es necesario invertir una matriz de orden $2(n-1)$. En principio, la resolución de este sistema de ecuaciones implica invertir una matriz real de orden el doble al obtenido en

el método de desajuste de potencias en (56), donde la matriz a invertir es compleja.

Desde el punto de vista computacional, es más rentable invertir una matriz compleja a una matriz real, cuando el orden de la real es el doble de la compleja, y sobre todo cuando el orden de la matriz aumenta, como es el caso de redes de distribución grandes.

Sin embargo, para las redes de distribución utilizadas en este trabajo la precisión obtenida en la primera iteración mediante las ecuaciones de desajuste de corrientes es muy superior a la obtenida por las ecuaciones de desajuste de potencia.

A continuación se desarrolla la ecuación (73), con el objeto de buscar una aproximación que permita obtener un sistema de ecuaciones lineales complejo pero de orden $n-1$.

$$\begin{bmatrix} -2P_i - Y_{is}^{re} \\ 2Q_i - Y_{is}^{im} \end{bmatrix}_{i \neq s} = \begin{bmatrix} Y_{ij}^{re} & -Y_{ij}^{im} \\ Y_{ij}^{im} & Y_{ij}^{re} \end{bmatrix}_{\substack{i,j \neq s \\ i,j \neq s}} \begin{bmatrix} U_i^{re} \\ U_i^{im} \end{bmatrix}_{i \neq s} + \begin{bmatrix} -P_i & -Q_i \\ Q_i & -P_i \end{bmatrix}_{i \neq s} \begin{bmatrix} U_i^{re} \\ -U_i^{im} \end{bmatrix}_{i \neq s} \quad (74)$$

Agrupando (74) en forma compleja se obtiene la ecuación (75), que aplicada a todos los nudos menos al nudo slack, corresponde con un sistema de ecuaciones lineales aunque con el inconveniente que aparecen como incógnitas las tensiones de los nudos y su conjugada compleja.

$$-2\bar{S}_i^* - \bar{Y}_{is} = \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq s}}^n \bar{Y}_{ij} \bar{U}_j - \bar{S}_i^* \bar{U}_i^* \quad (75)$$

Ahora bien, teniendo en cuenta que en las redes de distribución los argumentos de las tensiones de los nudos son muy próximos entre sí, se podría aceptar como aproximación el considerar que $\bar{U}_i \cong \bar{U}_i^*$. Sustituyendo esta aproximación en (75) y agrupando términos, se tiene:

$$-2\bar{S}_i^* - \bar{Y}_{is} = (\bar{Y}_{ii} - \bar{S}_i^*) \bar{U}_i + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq s \\ j \neq i}}^n \bar{Y}_{ij} \bar{U}_j \quad (76)$$

El sistema de ecuaciones planteado a todos los nudos menos al nudo slack sería el siguiente:

$$\begin{bmatrix} -2\bar{S}_1^* - \bar{Y}_{1s} \\ -2\bar{S}_2^* - \bar{Y}_{2s} \\ \vdots \\ -2\bar{S}_n^* - \bar{Y}_{ns} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{Y}_{11} - \bar{S}_1^* & \bar{Y}_{12} & \cdots & \bar{Y}_{1n} \\ \bar{Y}_{21} & \bar{Y}_{22} - \bar{S}_2^* & \cdots & \bar{Y}_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \bar{Y}_{n1} & \bar{Y}_{n2} & \cdots & \bar{Y}_{nn} - \bar{S}_n^* \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{U}_1 \\ \bar{U}_2 \\ \vdots \\ \bar{U}_n \end{bmatrix} \quad (77)$$

La ventaja de este sistema frente al (75), es que la matriz a invertir posee un orden la mitad, aunque la precisión es ligeramente inferior. Respecto al método de desajuste de potencias (56), la aproximación realizada al método de desajuste de corrientes posee la misma complejidad computacional y para las redes de distribución utilizadas en este trabajo arrojan resultados más precisos. En el apartado 6.3 se presentan los resultados obtenidos para las redes de distribución utilizadas en el presente trabajo.

Capítulo 6

RESULTADOS

Una característica relevante de la heurística seleccionada en el Capítulo 3 , es que permite la creación de una gran variedad de algoritmos. Evidentemente, unos pocos serán seleccionados como los más prometedores. No obstante, para alcanzar dicho objetivo se recopilará una gran cantidad de datos, resultado de innumerables experimentos, que será necesario ordenar y catalogar para discernir las bondades de los algoritmos planteados.

Por extensión en cuanto a la información obtenida de los innumerables experimentos, en este capítulo se presentan los resultados más relevantes, o bien un resumen o catalogación de los mismos. Se ha dejado para los apéndices la recopilación exhaustiva de los resultados con el fin de no extender este capítulo.

La estructura de este capítulo comprende cinco apartados. En primer lugar se recopilan los datos más relevantes de las redes de test, dejando para los apéndices la descripción completa de dichas redes. Es en el segundo apartado donde se presenta una descripción de los resultados obtenidos con los algoritmos enumerados en el Capítulo 4 , para posteriormente, en un tercer apartado realizar un análisis comparativo de los mismos.

Evalrados los resultados de cada uno de los algoritmos así como un resumen de las características de cada uno, quedaría por incluir la aportación de los métodos aproximados utilizados para resolver el problema del reparto de cargas analizados en el Capítulo 5 . En primer lugar, en el apartado 6.3 se analizan los resultados en cuanto a precisión de los métodos de reparto de carga utilizados, y en segundo lugar cómo afecta dicha precisión a la calidad de la solución obtenida por los diferentes algoritmos planteados para la resolución del problema de reconfiguración de redes.

6.1 Redes de test

Se ha procurado utilizar el mayor número de redes de test. Para ello, a partir de la información obtenida de la revisión histórica se han entresacado todas las redes de la literatura técnica utilizadas para la resolución del problema de reconfiguración de redes.

En el apéndice se relacionan las redes de test, presentando un esquema gráfico de su configuración así como tablas con los datos característicos de las líneas y las cargas de los nudos. Las redes, por tanto, utilizadas en este trabajo son:

- Red de 10 nudos de Glamocanim [22] (red10g).
- Red de 14 nudos de Civanlar et al. [17] (red14c).
- Red de 16 nudos de Ali Abur [1] (red16a).
- Red de 33 nudos de Baran y Wu [5] (red33bw).
- Red de 69 nudos de Chian y Jean Jumeau [15] (red69cj).
- Red de 69 nudos de Das [19] (red69d).
- Red de 84 nudos de Su y Lee [64] (red84sl).
- Red de 118 nudos de Zhang [70] (red118z).
- Red de 137 y 205 nudos de Ramos et al. [52] (red137p-red205p).
- Red de 273 nudos (red273).

A continuación, en la Tabla 6 se enumeran los datos más relevantes de dichas redes.

Tabla 6 Datos característicos de las redes de test

Redes	Nº nudos	Nº ramas	Nº eslabones	Potencia base (MVA)	Tensión base (kV)	Impedancia base (Ω)
red10g	10	13	4	10	10	10
red14c	14	16	3	10	10	10
red16a	16	21	6	100	23	5.290
red33bw	33	37	5	10.00	12.66	16.028
red69cj	69	73	5	0.1	12.66	1602.756
red69d	69	79	11	0.1	11	1210
red84sl	84	96	13	1	10	100
red118z	118	132	15	0.1	11	1210
red137p	137	148	12	0.1	12.66	1602.756
red205p	205	224	20	0.1	12.66	1602.756
red273	273	299	27	0.1	12.66	1602.756

De entre las redes relacionadas en la tabla anterior, la última, la red de 273 nudos es una

red propuesta en este trabajo. Al igual que las redes de 137 y 205 nudos, la red de 273 nudos es una composición de redes de 69 nudos de Chian y Jean Jumeau [15], en concreto de cuatro redes.

6.2 Análisis de los resultados obtenidos para los diferentes algoritmos

La diversidad de algoritmos presentado en el Capítulo 4 , obliga a presentar y evaluar los resultados de forma agrupada en cuanto a las categorías de algoritmos, para luego poder realizar análisis comparativos entre ellos. En el apartado 7.2.1 del apéndice se presentan los resultados tabulados para cada algoritmo aplicado a las redes de test. En dichas tablas se aporta la siguiente información para cada solución:

- La indicación de la solución especificando las ramas abiertas.
- Las pérdidas de dicha solución.
- Un índice de calidad de la solución.
- El número de repartos de carga.
- El tiempo de computación del algoritmo.

El criterio para decidir si un algoritmo es mejor que otro en general suele ser un compromiso entre la calidad de la solución obtenida y el tiempo que tarda en obtenerla.

En primer lugar, se centrará el análisis en la calidad del algoritmo. Para tal fin, se ha definido un índice de calidad simple el cual consiste en el cociente entre la *solución óptima* y la solución obtenida por el algoritmo. Este índice, por tanto, tendrá un valor la unidad si la solución obtenida por el algoritmo es la óptima, o bien un valor menor que la unidad para soluciones por debajo de la óptima.

Ahora bien, no se tiene certeza absoluta de conocer las soluciones óptimas de las redes de test utilizadas en este trabajo. Tal incertidumbre es debida, bien porque algunas de las soluciones publicadas han sido mejoradas o bien porque a las redes grandes es imposible aplicarle un algoritmo de fuerza bruta.

En la Tabla 7 se anota la mejor solución publicada de las redes de test. Se indica la solución mediante la enumeración de las ramas abiertas así como mediante la indicación de las pérdidas que provoca dicha configuración. Las mejores soluciones corresponden precisamente con las publicadas por los autores que proponen dichas redes, salvo la red de 69 nudos de Das [19]. En este caso particular en la referencia Martín y Gil [47] aparece una mejor solución, superada posteriormente en esta tesis. En general, en esta tesis se han obtenido soluciones mejores para las redes de 69 nudos de Das [19], la de 84 nudos de Su y Lee [64] y la de 205 nudos de Ramos et al. [52].

Pues bien, teniendo en cuenta las circunstancias anteriormente mencionadas respecto a la solución óptima de las redes de test, se va a adoptar como *solución óptima* la mejor solución obtenida en esta tesis. Dichas soluciones se indican en la Tabla 8 .

Tabla 7 Mejor solución publicada en la literatura técnica de las redes de test

Redes	Mejor solución publicada	Pérdidas (kW)
red10g	4-8-9-12	268.288
red14c	7-8-16	466.127
red16a	10-15-16-17-19-21	10340.5
red33bw	7-9-14-32-37	139.551
red69cj	14-58-61-69-70	30.093
red69d	13-28-45-51-67-70-73-75-76-78-79	203.861
red84sl	7-13-34-39-41-55-62-72-83-86-89-90-92	626.446
red118z	23-26-34-39-42-51-58-71-74-95-97-109-122-129-130	869.726
red137p	14-58-61-69-70-87-131-134-142-143-147-148	60.186
red205p	13-58-61-69-70-83-85-91-97-131-134-147-148-161-168-169-206-209-217-222	87.099

Tabla 8 Mejor solución obtenida de las redes de test

Redes	Mejor solución obtenida	Pérdidas (P_{MS}) (kW)
red10g	4-8-9-12	268.288
red14c	7-8-16	466.127
red16a	10-15-16-17-19-21	10340.5
red33bw	7-9-14-32-37	139.551
red69cj	14-58-61-69-70	30.093
red69d	13-30-45-51-66-70-75-76-77-78-79	201.412
red84sl	7-13-34-39-42-55-62-72-83-86-89-90-92	624.808
red118z	23-26-34-39-42-51-58-71-74-95-97-109-122-129-130	869.726
red137p	14-58-61-69-70-87-131-134-142-143-147-148	60.186
red205p	14-58-61-69-70-87-98-127-133-142-143-145-147-148-164-169-206-209-217-219	85.092
red273	16-21-45-58-61-69-87-98-127-133-142-143-145-147-161-168-206-209-217-224-225-233-235-243-281-284-293	188.941

Por tanto, el índice de calidad de pérdidas queda definido según:

$$I_P = \frac{P_{MS}}{P} \quad (78)$$

Donde:

- P_{MS} Potencia de pérdidas de la mejor solución obtenida (Tabla 8)
 P Potencia de pérdidas obtenida por el algoritmo en cuestión

Se observa que para un índice dado, el incremento de pérdidas que se obtendría respecto a la mejor solución obtenida sería:

$$\Delta P = P(1 - I_p) \quad (79)$$

$$\Delta P(\%) = 100(1 - I_p) \quad (80)$$

La segunda variable a tener presente para evaluar la bondad de un algoritmo es el tiempo de cómputo que tarda en ejecutarse. Para cada experimento realizado se ha medido el tiempo de CPU utilizado. Si bien hay que decir que dicho tiempo medido no es precisamente el tiempo utilizado en computar, ya que se ve afectado por la cantidad de memoria usada. En cierto modo, es más realista tener en cuenta el uso de memoria. Aún así, hay que decir que dichos tiempos son indicadores para establecer un ranking entre los diferentes algoritmos. Por otra parte, se ha utilizado el número de repartos de carga realizado por el algoritmo como una medida de la complejidad del mismo, que en realidad está directamente relacionado con el tiempo que tarda en ejecutarse el algoritmo.

Por tanto, para establecer un ranking se han definido dos índices que informen del tiempo de ejecución de los algoritmos. El primero, se basa en los tiempos de CPU. Para cada red de test se ha dado un valor a cada algoritmo de 0 a 100. Al algoritmo que haya tardado menos tiempo se le asigna el valor 100 y al que haya tardado más el valor 0. De esta forma se tiene un ranking por red de test. Este índice se define para cada red como:

$$I_T(r) = 100 \frac{t_{\max}(r) - t(r)}{t_{\max}(r) - t_{\min}(r)} \quad (81)$$

Donde:

$t_{\max}(r)$ El tiempo que ha tardado el algoritmo más lento para resolver la red r

$t_{\min}(r)$ El tiempo que ha tardado el algoritmo más rápido para resolver la red r

$t(r)$ El tiempo que ha tardado un determinado algoritmo para resolver la red r

Mediante el índice (81) se consigue clasificar a cada algoritmo para una red en particular. Para obtener una clasificación que tenga en cuenta todas las redes, dada su representatividad frente a tamaño, se ha optado por asignar un valor a cada algoritmo que sea la media de los valores de los índices que posee dicho algoritmo para cada red. Dicho índice sería según (82):

$$I_T = \frac{1}{r} \sum_{i=1}^r I_T(i) \quad (82)$$

Igual tratamiento se ha seguido con respecto a los números de reparto de cargas que realiza cada algoritmo. Se ha definido un índice para cada red de test (83) y luego se ha promediado para cada algoritmo (84).

$$I_{RC}(r) = 100 \frac{n_{\max}(r) - n(r)}{n_{\max}(r) - n_{\min}(r)} \quad (83)$$

Donde:

$n_{\max}(r)$ Máximo número de repartos de carga realizado por un algoritmo para resolver la red r

$n_{\min}(r)$ Mínimo número de repartos de carga realizado por un algoritmo para resolver

la red r
 $n(r)$ Número de repartos de carga que realiza un determinado algoritmo para resolver la red r

$$I_{RC} = \frac{1}{r} \sum_{i=1}^r I_{NR}(i) \quad (84)$$

En el apéndice 7.2.2 se han recopilado los valores de los índices promedios correspondientes a los tiempos de ejecución (I_T) y los correspondientes al número de repartos de carga (I_{RC}).

El análisis de los algoritmos se realizará teniendo como referencia estos índices: índice de pérdidas, índice de tiempos e índice de repartos de carga. Además, dicho análisis tal como se mencionó al principio, se dividirá por grupos comenzando por los algoritmos mallados.

6.2.1 Análisis de los algoritmos mallados

Una de las ventajas de los algoritmos mallados es que se puede probar con diferentes criterios de ordenación de los nudos de ruptura. En este trabajo, se ha probado con innumerables criterios, a saber: mínima tensión, máximo/mínimo argumento, máxima/mínima tensión de activa y reactiva y máxima/mínima potencia activa, reactiva y aparente de los nudos. Ninguno de los criterios enumerados anteriormente arroja resultados tan satisfactorios como la ordenación por máxima tensión.

La utilización de la versión iterativa de los algoritmos para las distintas versiones del algoritmo M-02 ha conllevado peores resultados, aún partiendo de igual resultado en algunas variantes. Y en otras variantes como en la variante 3 no tiene mucho sentido dado que los nudos no se ordenan por máxima tensión.

Una ventaja de los algoritmos mallados frente al resto es que el número de repartos de carga que realiza, si bien no está exactamente definido, sí que está acotado. En la Tabla 9 aparece el número de repartos de carga de cada algoritmo en función del número de lazos que posea la red.

Respecto a los valores que se presentan en dicha tabla hay que realizar las siguientes observaciones:

- Para los algoritmos 1 y 2, así como sus variantes y las versiones iterativas, los valores indicados coinciden exactamente, siempre y cuando los nudos de ruptura fuesen de grado de entrada igual a dos. En el caso de que hubiese algún nudo de ruptura con un grado de entrada superior a dos, el número de repartos de carga sería inferior al indicado, de ahí que aparezca en la tabla el signo 'menor o igual que'.
- Para el algoritmo 3 y su versión iterativa, ocurre que en el último lazo a evaluar, el número de ramas candidatas puede ser superior a dos, y por tanto, el número de repartos de cargas sería mayor al indicado en la expresión.
- Para el algoritmo 4 y su versión iterativa, ocurre algo parecido que con el 3, y es que el número de ramas candidatas es normalmente superior a dos, resultando en un aumento

del número de repartos de carga.

Visto lo anterior, se podría inferir que para los algoritmos 3 y 4, y sus respectivas versiones iterativas el número de repartos de carga sería ligeramente superior. Sin embargo, al mismo tiempo puede ocurrir que el grado de entrada sea superior a dos para determinados nudos de ruptura. Se tiene pues, que por un lado se aumentaría y por otro disminuiría el número de repartos de carga. De ahí que en la Tabla 9 para estos algoritmos se utilice el símbolo ' $\approx$ ' para indicar que el número es aproximado.

Tabla 9 Número de repartos de carga algoritmos mallados

Algoritmo	N_{RC}
M01	$\leq 1 + 2l$
M02	$\leq 3l$
M02-var1	$\leq 3l$
M02-var2	$\leq 3l$
M02-var3	$\leq l + 2 \sum_{i=1}^l i$
M02-var4	$\leq l + 2 \sum_{i=1}^l i$
M02-var5	$\leq l + 2 \sum_{i=1}^l i$
M03	$\approx 3l$
M04	$\approx 3l$
M01-iter	$\leq l + 2 \sum_{i=1}^l i$
M02-iter	$\leq 3 \sum_{i=1}^l i$
M03-iter	$\approx 3 \sum_{i=1}^l i$
M04-iter	$\approx 3 \sum_{i=1}^l i$

Una vez hechas las consideraciones anteriores se analiza en cuanto a los índices de calidad propuestos los diferentes algoritmos mallados.

El objetivo del problema de reconfiguración de redes es alcanzar la red radial de mínimas pérdidas en un tiempo razonable. En la Tabla 10 se presenta el cumplimiento de dicho objetivo en cuanto a mínimas pérdidas y en la Tabla 11 con respecto al tiempo.

Tabla 10
Índice de pérdidas de los algoritmos mallados para cada red de test

Red \ Alg	M01	M01-iter	M02	M02-iter	M02-var-1	M02-var-2	M02-var-3	M02-var-4	M02-var-5	M03	M03-iter	M04	M04-iter
red10g	1	1	1	1	1	1	0.961353	0.709336	0.709336	1	1	1	1
red14c	1	1	1	1	1	1	0.661148	0.661148	0.661148	1	1	1	1
red16a	0.994841	0.999982	0.994841	0.999982	0.994841	0.994841	0.993264	0.994841	0.994841	0.994841	0.999982	0.994841	0.999982
red33bw	1	1	1	1	1	1	1	0.981613	0.994813	1	1	1	1
red69cj	0.998114	1	0.998114	1	0.998114	0.998114	0.679416	0.654217	0.654217	0.998114	1	0.998114	1
red69d	0.986773	1	0.999849	1	0.999849	0.985731	0.983281	0.986773	0.979701	0.999849	1	0.999849	1
red84sl	0.99659	0.998871	0.99659	0.998871	0.99831	0.997149	0.917699	0.823074	0.880894	0.99659	1	0.997713	1
red118z	0.994407	1	1	1	1	1	0.975162	0.990342	0.85538	1	1	1	1
red137p	0.998114	1	0.998114	1	0.998114	0.993106	0.786364	0.786364	0.804287	0.998114	1	0.998114	1
red205p	0.989605	0.998414	0.970511	1	0.989605	0.9714	0.990362	0.85957	0.82794	0.970511	1	0.989605	1
red273	0.957772	0.991423	0.958356	0.999915	0.958356	0.990243	0.664551	0.605723	0.63155	0.958356	1	0.958356	0.997753

Tabla 11 Ordenación de los algoritmos mallados en cuanto a tiempo de ejecución

I_T (%)	Algoritmo	I_{RC} (%)	Algoritmo
100.00	M01	100.00	M01
95.82	M02-var2	94.41	M02
95.77	M02	94.34	M02-var-2
95.66	M02-var1	94.32	M02-var-1
94.90	M03	93.57	M03
81.67	M04	90.21	M04
67.43	M02-var4	51.61	M01-iter
67.35	M02-var3	51.42	M02-var-4
67.16	M01-iter	51.06	M02-var-3
66.21	M02-var5	50.23	M02-var-5
44.35	M02-iter	30.69	M02-iter
37.46	M03-iter	25.49	M03-iter
12.04	M04-iter	13.17	M04-iter

De dichas tablas se deduce:

- Los algoritmos que más se acercan a la solución objetivo son los correspondientes a la versión iterativa de los mismos. En concreto el algoritmo M03 iterativo es el que mejores resultados obtiene. Por otra parte se observa que son los más lentos.
- El algoritmo más rápido con diferencia es el algoritmo M01.
- Los algoritmos M02, M03 y M04 no aportan mucha mayor calidad en la solución con respecto al algoritmo M01.

6.2.2 Análisis de los algoritmos radiales

A diferencia de los algoritmos mallados que son independientes de la configuración de la red, los algoritmos radiales necesitan de una solución inicial. Esta solución inicial no es otra que el estado en el que se encuentre la red.

En la Tabla 12 se indica el estado de operación en el que se encuentran las redes, el cual es usado como solución inicial de partida para los algoritmos radiales.

A diferencia de los algoritmos mallados no es posible establecer el número de repartos de carga a realizar, dado que el criterio de paro no permite averiguar de una forma determinista cuando se alcanzará. En estos algoritmos se va buscando una solución que mejore la actual. Se podría establecer como criterio de paro que cuando un intercambio no provoque una mejora se detenga el algoritmo, pero esto daría soluciones muy lejanas de la óptima. El criterio establecido en los algoritmos en esta tesis ha sido la de parar cuando no se encuentre una solución mejor y se haya repetido la misma solución un número igual al número de eslabones de la red en cuestión.

Tabla 12 Configuración radial inicial para los algoritmos radiales

Redes	Configuración radial inicial	Pérdidas (kW)
red10g	10-11-12-13	277.127
red14c	14-15-16	511.436
red16a	10-17-18-19-20-21	14900.2
red33bw	33-34-35-36-37	202.677
red69cj	69-70-71-72-73	69.776
red69d	69-70-71-72-73-74-75-76-77-78-79	227.526
red84sl	84-85-86-87-88-89-90-91-92-93-94-95-96	711.727
red118z	118-119-120-121-122-123-124-125-126-127-128-129-130-131-132	1298.08
red137p	69-70-71-72-73-142-143-144-145-146-147-148	139.552
red205p	69-70-71-72-73-142-143-144-145-146-147-148-217-218-219-220-221-222-223-224	209.328
red273	69-70-71-72-73-142-143-144-145-146-147-148-217-218-219-220-221-222-223-224-292-293-294-295-296-298-299	377.872

Con la variante 1 de ambos algoritmos, donde se altera el orden de ataque de los lazos, se alcanzan mejores resultados en algunos casos mientras que en otros no.

Respecto a la variante 2 de los algoritmos radiales, no se han alcanzado mejoras, de hecho todos los intercambios con las ramas alternativas han dado como resultado las mismas soluciones. Sin embargo si se reinicia el algoritmo con una solución inicial diferente, donde se ha introducido alguna rama alternativa, en algunos casos se alcanza una solución mejor. Queda patente que el orden de atacar los lazos afecta a la solución obtenida.

Finalmente, examinando la Tabla 13 y la Tabla 14 se observa:

- Los resultados en cuanto a calidad de la solución son prácticamente los mismos.
- El algoritmo R02 es ligeramente superior en calidad al algoritmo R01
- El algoritmo R01 es el más rápido.
- El uso de una algoritmo radial encadenado a otro, como por ejemplo el algoritmo R01-R02 no mejora la solución.

Tabla 13 Ordenación de los algoritmos radiales en cuanto a tiempo de ejecución

I_T (%)	Algoritmo	I_{RC} (%)	Algoritmo
72.77	R01	72.30	R01
71.82	R01-var.-1	70.20	R01-var.-1
68.86	R01-var.-2	65.36	R01-var.-2
57.80	R02	62.25	R02
53.48	R02-var.-1	57.62	R02-var.-1
47.29	R01-R02	49.30	R02-var.-2
38.98	R02-var.-2	43.45	R01-R02

Tabla 14
Índice de pérdidas de los algoritmos radiales para cada red de test

Red \ Alg	R01	R01-var-1	R01-var-2	R02	R02-var-1	R02-var-2	R01-R02
red10g	0.968103	0.968103	0.968103	0.968103	0.968103	0.968103	0.968103
red14c	1	1	1	1	1	1	1
red16a	1	1	1	1	1	1	1
red33bw	1	1	1	1	1	1	1
red69cj	1	1	1	1	1	1	1
red69d	0.987989	0.983527	0.987989	0.987989	0.983527	0.987989	0.987989
red84sl	0.998871	0.998871	0.998871	1	1	1	1
red118z	0.992162	0.979879	0.992162	0.994134	0.980093	0.994134	0.994134
red137p	1	1	1	1	1	1	1
red205p	0.970071	0.989252	0.970071	0.970071	0.989531	0.970071	0.970071
red273	0.99455	0.999986	0.99455	0.99455	1	0.99455	0.99455

6.2.3 Análisis de los algoritmos híbridos e híbridos con reinicio

Estos algoritmos son evidentemente una combinación de los algoritmos mallados y radiales, y por tanto, poseen las mismas características. Sin embargo, es importante hacer notar que los algoritmos híbridos con reinicio poseen el inconveniente de que pueden no cumplir con el criterio de paro debido a que pueden quedarse encerrados en un bucle. Para resolverlo es necesario cambiar el criterio de paro. Todos los algoritmos híbridos con reinicio cuando se aplican a la red de 273 nudos poseen este inconveniente.

Examinando la Tabla 15 , la Tabla 16 y la Tabla 17 se observa:

- Los resultados en cuanto a calidad de la solución son prácticamente los mismos.
- Los algoritmos híbridos presentan mejores resultados para la red de 273 nudos que los algoritmos híbridos con reinicio debido al problema de volverse cíclicos.
- Los algoritmos híbridos son más rápidos que los algoritmos híbridos con reinicio.

Tabla 15 Ordenación de los algoritmos híbridos e híbridos con reinicio por tiempo de ejecución

I_T (%)	Algoritmo	I_{RC} (%)	Algoritmo
77.19	M01-R01	69.70	M01-R01
75.19	M02-R01	65.51	M02-R01
73.60	M03-R01	64.68	M03-R01
66.73	M01-R01-reinicio	62.47	M01-R02
65.50	M01-R02	61.35	M04-R01
63.78	M02-R02	58.55	M01-R01-reinicio
62.35	M03-R02	57.84	M02-R02
61.56	M04-R01	57.00	M03-R02
58.98	M02-R01-reinicio	54.28	M04-R02
57.46	M03-R01-reinicio	50.63	M02-R01-reinicio
54.19	M01-R02-reinicio	50.13	M01-R02-reinicio
53.57	M04-R02	49.67	M03-R01-reinicio
46.65	M04-R01-reinicio	43.91	M04-R01-reinicio
45.95	M02-R02-reinicio	41.30	M02-R02-reinicio
44.15	M03-R02-reinicio	40.35	M03-R02-reinicio
33.83	M04-R02-reinicio	37.21	M04-R02-reinicio

Tabla 16
Índice de pérdidas de los algoritmos híbridos para cada red de test

[illegible]

Tabla 17											
Índice de pérdidas de los algoritmos híbridos con reinicio para cada red de test											
Red \ Alg	M01-R01	M01-R02	M02-R01	M02-R02	M03-R01	M03-R02	M04-R01	M04-R02			
red10g	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
red14c	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
red16a	0.999982	0.999982	0.999982	0.999982	0.999982	0.999982	0.999982	0.999982	0.999982	0.999982	0.999982
red33bw	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
red69cj	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
red69d	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
red84sl	0.998871	1	0.998871	1	0.998871	1	1	1	1	1	1
red118z	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
red137p	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
red205p	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
red273	0.979638	0.979638	0.979638	0.979638	0.979638	0.979638	0.985447	0.979638	0.985447	0.985447	0.985447

6.2.4 Resumen final

Tras analizar cada grupo de algoritmos, y de las deducciones realizadas, los algoritmos más prometedores en cuanto a calidad y rapidez de ejecución son:

- Algoritmo mallado M01
- Algoritmo mallado M01 iterativo
- Algoritmo mallado M02 iterativo
- Algoritmo mallado M03 iterativo
- Algoritmo radial R01
- Algoritmo radial R02
- Algoritmo híbrido M01-R02

Al igual que se ha hecho con los tiempos y los repartos de carga, se procede de igual forma para obtener un índice de calidad del algoritmo independiente de la red de test. Para ello se promedia los índices calculados para cada red según (85).

$$I_p = \frac{1}{r} \sum_{i=1}^r I_p(i) \quad (85)$$

En la Tabla 18 se presentan los valores del índice de calidad de potencia según (85) y los valores del índice promedio entre el índice de tiempos y el índice de repartos de carga definidos por (82) y (84) respectivamente.

Tabla 18 Índice de calidad de potencia para los algoritmos

Algoritmo	Índice I_p	Índice $\frac{1}{2} \cdot (I_T + I_{RC})$
M01	0.99238	0.60025
M01-iter	0.99897	0.31475
M02-iter	0.99988	0.59385
M03-iter	0.99999	1.00000
R01	0.99197	0.63985
R02	0.99225	0.72535
M01-R02	0.99950	0.37520

Con el objeto de tener una visión más representativa de dichos valores, en la Figura 8 se han representado los algoritmos tabulados en la tabla anterior. En el eje de ordenadas se ha representado el índice de calidad de la solución, mientras que en el eje de abscisas el índice que muestra la rapidez del algoritmo. En dicha figura, el algoritmo ideal sería aquel que estuviese situado en el punto (1,1).

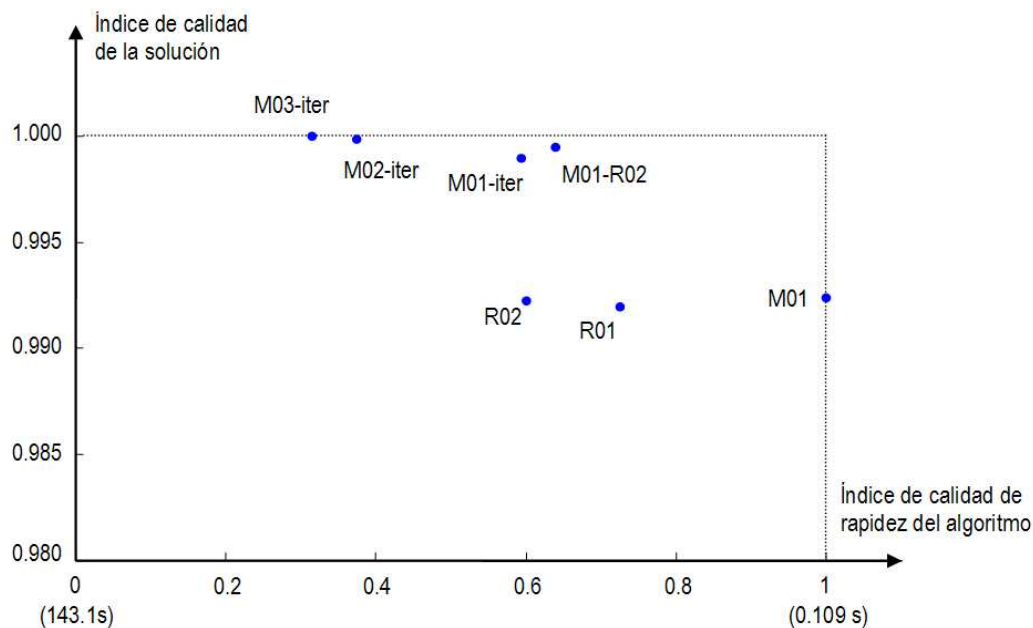


Figura 8 Calidad versus rapidez de los algoritmos más prometedores

De la Figura 8 se observa:

- El algoritmo más exacto es el algoritmo M03 iterativo y también el más lento con diferencia.
- El algoritmo M02 iterativo es ligeramente mejor que el algoritmo M03 en cuanto a rapidez. En cuanto a calidad de la solución son muy parecidos.
- El algoritmo M01 iterativo presenta un cambio relevante en cuanto a tiempo frente a los dos iterativos M02 y M03, sin embargo es superado por el algoritmo híbrido M01-R02.
- Los algoritmos radiales presentan los resultados más desfavorables ya que en cuanto a calidad de la solución se encuentran muy por debajo de los mallados iterativos y los híbridos. Con respecto al tiempo de resolución se encuentran muy por debajo del algoritmo M01, el cual presenta el menor tiempo.
- El algoritmo M01 es el algoritmo más rápido, si bien la calidad de la solución está por debajo de la mejor solución.

Respecto a la calidad de la solución, es necesario tener presente cuanto se está dispuesto a comprometer respecto a la reducción de pérdidas frente a la velocidad de ejecución del algoritmo. Si se atiende a los resultados obtenidos por el algoritmo M01, se observa que el índice de calidad de la solución en el caso más desfavorable (red273) es de 0.957772 (4.22%), mientras que para el resto de redes resulta desde 0.98659 (1.34%) a la unidad (0%). El valor entre paréntesis junto al índice indica el tanto por ciento con respecto a las pérdidas globales que no se optimizarían. También es importante anotar que habría que

restar a los valores obtenidos en tanto por ciento la clase de precisión con la que se miden las pérdidas.

6.3 Resultados de los métodos de resolución de los repartos de carga

En el Capítulo 5 se analizaron los métodos de resolución de repartos de carga y se introdujo un nuevo método basado en las ecuaciones expresadas mediante el desajuste de corrientes.

En este apartado se presentan algunos resultados tras aplicar dichos métodos, con el objeto de corroborar los resultados obtenidos al utilizarlos en los algoritmos de reconfiguración de redes. En la Tabla 82 de los apéndices se presentan las pérdidas obtenidas mediante los diferentes métodos para las redes de test, y en la Tabla 83 las tensiones (módulos) de los nudos de la red de 33 nudos de Baran y Wu [5].

Analizando los datos de las tablas mencionadas anteriormente, se presentan a continuación (Tabla 19 y Tabla 20) el error medio, la desviación estándar de los errores y el error máximo tanto para las potencias como para las tensiones.

Se observa, por comparación con el método 0, que el método que ofrece mejores resultados es el método 2, siguiéndole el método 3 con resultados muy cercanos. Finalmente, el método 1 es el que más se aleja de la solución obtenida por el método 0.

En cuanto a las tensiones ocurre igual que frente a las pérdidas. El método de desajuste de corrientes (métodos 2 y 3) presenta una mayor precisión que el método de desajuste de potencias (método 1).

Tabla 19 Errores de las pérdidas para las redes de test frente a los métodos de repartos de carga

Descriptores	Desajuste de potencias (Método 1)	Desajuste de corrientes (Método 2)	Aprox. desajuste de corrientes (Método 3)
Error medio (%)	6.6818	0.2439	0.3822
Desviación estándar (%)	1.8194	0.1586	0.1688
Error máximo (%)	9.9241	0.5576	0.6228

Tabla 20 Errores de las tensiones (red de Baran y Wu) frente a los métodos de repartos de carga

Descriptores	Desajuste de potencias (Método 1)	Desajuste de corrientes (Método 2)	Aprox. desajuste de corrientes (Método 3)
Error medio (%)	0.1178	0.0047	0.0075
Desviación estándar (%)	0.0525	0.0022	0.0036
Error máximo (%)	0.1904	0.0079	0.0125

Por último, indicar que se ha programado el método de Newton-Raphson expresando las ecuaciones mediante el desajuste de potencias y el desajuste de corrientes. Para las redes de test utilizadas en este trabajo, el método de desajuste de corrientes siempre ha alcanzado la solución, para una tolerancia especificada, una iteración antes que el método de desajuste de potencias.

6.4 Resultados de los algoritmos frente a los métodos de repartos de carga

En el apéndice 7.2.4 se presentan los resultados de los diferentes algoritmos ante los diferentes métodos de reparto de carga. Para cada algoritmo se ha realizado una tabla donde se aplica a cada red de test y para los cuatro métodos utilizados:

Método 0: Método de Newton-Rahpson

Método 1: Linealización de las ecuaciones expresadas mediante el desajuste de potencias

Método 2: Linealización de las ecuaciones expresadas mediante el desajuste de corrientes

Método 3: Aproximación de la linealización de las ecuaciones expresadas mediante el desajuste de corrientes

Para cada uno de los métodos de reparto de carga los parámetros representados en las tablas del apéndice 7.2.4 han sido: el índice de calidad de la solución obtenido frente a la mejor solución que se posee, el número de repartos de carga realizados por el algoritmo y el tiempo de ejecución del algoritmo.

Con el objeto de analizar la calidad de la solución ante los diferentes métodos de reparto de carga, se ha realizado un resumen de los datos del apéndice 7.2.4. Para ello, se presentan a continuación cuatro tablas donde se han agrupado los algoritmos bajo los grupos: mallados, radiales, híbridos e híbridos con reinicio.

En cada casilla se ha realizado la siguiente representación:

- Si en la casilla no aparece indicación alguna, se indica que los tres métodos de reparto de carga han alcanzado la misma solución.
- Se ha utilizado el color rojo para el método de desajuste de potencias (método 1), el azul para el método de desajuste de corrientes (método 2) y el color verde para el método de desajuste de corrientes aproximado (método 3).
- Mediante el símbolo ↓ se indica que la solución alcanzada es peor que la obtenida por el método iterativo de Newton-Raphson. Contrariamente, mediante el símbolo ↑, se indica que la solución alcanzada es mejor que la obtenida con el método iterativo de Newton-Raphson. Por último, el símbolo = indica que los resultados son los mismos que los obtenidos con el método de Newton-Raphson.

Tabla 21 Comparación algoritmos mallados

Alg\Red	10g	14c	16a	33bw	69cj	69d	84sl	118z	137p	205p	273
M01											↑ = =
M01 iter						↓ = =					
M02											
M02 iter			↓ ↓ ↓			↓ = =					↓ ↓ ↓
M02 var 1										↓ = =	
M02 var 2						↑ ↑ ↑				↓ = =	↑ ↓ ↓
M02 var 3											
M02 var 4							↑ = ↑				↓ = =
M02 var 5								↑ = =		↑ ↑ ↑	↑ ↑ ↑
M03											
M03 iter							↓ = =				↓ ↓ ↓
M04											
M04 iter						↓ = =				↓ = =	↓ ↑ ↑

Tabla 22 Comparación algoritmos radiales

Alg\Red	10g	14c	16a	33bw	69cj	69d	84sl	118z	137p	205p	273
R01						↑ = =	↓ = =	↓ = =		↓ ↓ ↓	↓ ↓ ↓
R01 var 1						↓ = =	↓ = =	↓ = =		↓ ↑ ↑	↓ = =
R01 var 2						↑ = =	↓ = =	↓ = =		↓ ↓ ↓	↓ = =
R02						↑ = =	↓ = =			↓ ↓ ↓	↓ = =
R02 var 1						↑ = =	↓ = =	↓ = =		= ↑ ↑	↓ = =
R02 var 2						↑ = =	↓ = =			↓ ↓ ↓	↓ = =
R01 - R02						↑ = =	↓ = =	↓ = =		↓ ↓ ↓	↓ = =

Tabla 23 Comparación algoritmos híbridos

Alg\Red	10g	14c	16a	33bw	69cj	69d	84sl	118z	137p	205p	273
M01-R01			↓ ↓ ↓			↓ = =	↓ = =				↓ = =
M01-R02						↓ = =	↓ = =				↓ = =
M02-R01			↓ ↓ ↓			↓ = =	↓ = =				↓ = =
M02-R02						↓ = =	↓ = =				↓ = =
M03-R01			↓ ↓ ↓			↓ = =	↓ = =				↓ = =
M03-R02						↓ = =	↓ = =				↓ = =
M04-R01			↓ ↓ ↓			↓ = =	↓ = =				↓ = =
M04-R02						↓ = =	↓ = =				↓ = =

Tabla 24 Comparación algoritmos híbridos con reinicio

Alg\Red	10g	14c	16a	33bw	69cj	69d	84sl	118z	137p	205p	273
M01-R01			↓ ↓ ↓			↓ =	↓ =				↑ ↑ ↑
M01-R02						↓ =	↓ =				↑ ↑ ↑
M02-R01			↓ ↓ ↓			↓ =	↓ =			↓ =	↑ ↑ ↑
M02-R02						↓ =	↓ =			↓ =	↑ ↑ ↑
M03-R01			↓ ↓ ↓			↓ =	↓ =			↓ =	↑ ↑ ↑
M03-R02						↓ =	↓ =			↓ =	↑ ↑ ↑
M04-R01			↓ ↓ ↓			↓ =	↓ =				
M04-R02						↓ =	↓ =				

Tras una inspección de las tablas anteriores se observa que los métodos 2 y 3 son muy superiores en cuanto a calidad de la solución frente al método 1. En la Tabla 25 aparece el recuento donde se indican los resultados frente al método usado como más preciso (método 0).

Tabla 25 Recuento de resultados

Método \ Resultados	Difieren	Mejores	Peores
Desajuste de potencias (método 1)	109	19	90
Desajuste de corrientes (método 2)	30	12	18
Aprox. desajuste de corrientes (método 3)	31	13	18

De esta última tabla se puede concluir que los métodos 2 y 3 arrojan unos resultados muy parecidos. En particular el método 3 difiere sólo en 31 resultados frente a los 396 experimentos, aunque sólo 18 son peores (4,5 %).

Con respecto a los tiempos de ejecución de los algoritmos dependiendo del método utilizado para resolver los repartos de carga se observa que en los tres métodos aproximados los tiempos son bastante mejores (inferiores) al método de Newton-Raphson, del orden de un tercio. En concreto, para los 396 experimentos realizados se ha calculado la mediana de los cocientes de los tiempos del método de Newton-Raphson con respecto a cada uno de los tres métodos, obteniéndose los valores: 3.5, 2.87 y 3.08. Estos valores son las veces que tarda más el método de Newton-Raphson frente a los métodos 1, 2 y 3. Por tanto, el método más rápido sería el 1, seguido del 3 y por último el método 2.

Este resultado es razonable, dado que la diferencia entre los tres métodos aproximados y el método de Newton-Raphson consiste en el número de veces que hay que invertir una matriz. Mientras en los métodos aproximados se invierte una matriz para el cálculo del reparto de cargas, en el método de Newton-Raphson se realiza tantas veces la inversión de una matriz como iteraciones se realicen en el algoritmo, y en el caso que nos ocupa generalmente son tres o cuatro iteraciones para la tolerancia especificada.

Capítulo 7

CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

En este capítulo se exponen las conclusiones obtenidas en la realización de este trabajo. Se destacan las principales aportaciones y las líneas de trabajo futuras en el campo de la reconfiguración de las redes de distribución eléctricas.

En este trabajo se ha abordado en profundidad el problema de reconfiguración de redes con respecto a la minimización de las pérdidas por las líneas y se han analizado las técnicas existentes para la solución del mismo.

Se ha investigado el problema y se ha propuesto una nueva heurística para resolver el problema de reconfiguración de redes, basada en el sentido de los flujos de potencia.

Se han desarrollado numerosos algoritmos basados en la heurística propuesta, y se han analizado sus resultados sobre diferentes redes de test.

Se ha introducido un nuevo método aproximado de resolución de las redes de distribución.

Del trabajo realizado en esta tesis se extraen un conjunto de conclusiones, agrupadas en: conclusiones propias de la heurística diseñada, conclusiones a raíz del comportamiento de los algoritmos desarrollados y por último algunas conclusiones respecto al método aproximado introducido para resolver el problema de flujo de potencia y su uso en los algoritmos propuestos.

Conclusiones propias de la heurística:

- Se ha diseñado una nueva heurística. Dicha heurística se basa en el sentido de los flujos de potencia por las líneas. Como consecuencia de la misma se ha introducido el concepto de nudo de ruptura para la potencia activa y reactiva en redes de corriente alterna.
- La heurística expuesta reduce notablemente el número de ramas candidatas, reduciendo el espacio de búsqueda. En general, el número de ramas candidatas se puede estimar de

forma aproximada como el doble del número de lazos de la red de distribución. Además, es importante resaltar que las ramas candidatas propuestas por la heurística son buenas aspirantes a ser ramas de la solución.

- La heurística propuesta posee la gran ventaja de seleccionar las ramas candidatas, de forma tal, que al abrirlas se tiene la seguridad de que el circuito es conexo. Esto es debido a que cada nudo de ruptura se encuentra asociado con un lazo básico de la red eléctrica. Esta propiedad evita tener que comprobar que la red se encuentre conexa, es decir, no queden cargas sin atender.

Conclusiones del conjunto de algoritmos desarrollados:

- Se ha diseñado un algoritmo mallado -algoritmo M01- que resuelve el problema de reconfiguración rápidamente y con soluciones muy próximas a las óptimas. Este algoritmo acota el número de flujos de potencia a realizar en función del número de lazos de la red, siendo éste como máximo de: $2 \cdot l + 1$.
- Desde el punto de vista de la calidad de la solución, el mejor comportamiento se consigue con el algoritmo mallado M03 iterativo, el cual ha alcanzado una elevada respuesta en cuanto a la calidad de la solución.
- Se ha diseñado un algoritmo que presenta un buen compromiso entre la calidad de la solución y el tiempo de obtención de la misma. Estos algoritmos han sido los algoritmos híbridos. De entre ellos, el mejor calificado es el algoritmo híbrido compuesto por el algoritmo mallado M01 seguido del algoritmo radial R02.
- Los algoritmos radiales presentan los resultados más desfavorables. En cuanto a calidad de la solución se encuentran cercanos al algoritmo mallado M01 y muy por debajo de los mallados iterativos y los híbridos. Un inconveniente adicional de los algoritmos radiales es que dependen de la solución inicial.

Conclusiones del método aproximado de resolución de los flujos de potencia:

- Se ha presentado un nuevo método aproximado para la resolución del problema de flujo de potencia para las redes de distribución basado en las ecuaciones de desajuste de corrientes. Dicho método aproximado posee una mayor precisión, para las redes de test propuestas en este trabajo, respecto a la linealización de las ecuaciones de desajuste de potencias.
- El uso del método aproximado propuesto para la resolución del problema de flujos de potencia, ha reducido en un orden de algo más de la mitad y media el tiempo de ejecución de los algoritmos.

Desarrollos futuros:

Las técnicas o métodos utilizados en general para la resolución del problema de reconfiguración de redes, bien podrían aplicarse a otros problemas muy parecidos o que se

deriven del mismo. Se enuncian a continuación algunas líneas futuras de trabajo:

- En las redes de distribución, además del problema de reconfiguración por minimización de pérdidas, existen otros problemas: el problema de reconfiguración por equilibrio de cargas, el problema de reconfiguración por emergencia y el problema de reconfiguración por mantenimiento. Estas nuevas cuestiones son alternativas de estudio para futuros trabajos.
- La proliferación de la generación distribuida y los nuevos escenarios que pueden aparecer en el sector eléctrico, hacen que surjan nuevos problemas a estudiar. Uno de ellos es que en la red de distribución aparecen varias fuentes generadoras de energía eléctrica. Estas nuevas cuestiones son líneas de estudio como continuación a este trabajo.
- Actualmente las redes de distribución de media tensión no son observables como las redes de transporte y reparto, es decir, no se poseen las medidas de las variables de control en tiempo real. En las redes de media tensión sólo se posee información de las variables de la cabecera o el alimentador de la misma. En el futuro se prevé que estas redes sean automatizadas y controladas remotamente, al menos en las líneas más críticas. La planificación de los interruptores a instalar es un estudio futuro a plantearse haciendo uso de la heurística desarrollada en este trabajo.

APÉNDICES

En estos apéndices se ha recogido aquella información que por su longitud y su naturaleza no es tratada en los capítulos principales de esta tesis.

En primer lugar se presentan los datos de las redes de test, y en un segundo lugar diferentes tablas de resultados obtenidos para los diferentes algoritmos y diferentes redes de test, ordenados por algoritmos, con el objeto de dar una información más completa sobre los mismos. También se presenta una comparativa de resultados en función del método utilizado para resolver los repartos de carga.

7.1 Datos de las redes de test

La información correspondiente a cada una de las redes utilizadas como redes de prueba en este trabajo se presenta mediante un grafo de cada red junto con una tabla donde se indican los parámetros de las líneas y la topología de la red.

En el grafo, el nudo representado más a la izquierda corresponde con el nudo alimentador del circuito. Las ramas inicialmente abiertas se representan en discontinuo. Estas ramas representan el estado inicial de la red radial.

Las tablas se encuentran divididas verticalmente en dos partes. La parte de la izquierda corresponde con la información de las líneas de la red (su impedancia y topología), mientras que la parte de la derecha posee la información de las cargas en cada nudo.

7.1.2 Red de 14 nudos (Civanlar et al.)

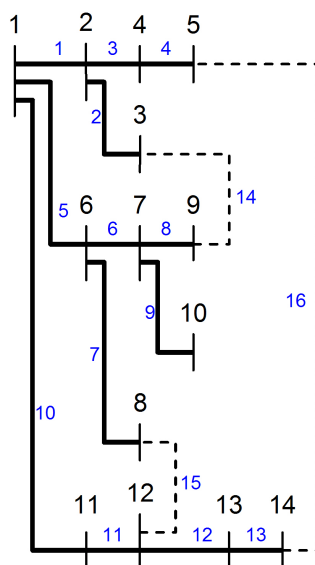


Figura 10 Grafo de la red de 14 nudos (Civanlar et al.)

Tabla 27 Red de 14 nudos (Civanlar et al.)

Nº rama	Nudo origen	Nudo destino	R(pu)	X(pu)	Nudo	P (MW)	Q (MVar)
1	1	2	0.075	0.1	1	0	0
2	2	3	0.08	0.11	2	2	1.6
3	2	4	0.09	0.18	3	3	0.4
4	4	5	0.04	0.04	4	2	-0.4
5	1	6	0.11	0.11	5	1.5	1.2
6	6	7	0.08	0.11	6	4	2.7
7	6	8	0.11	0.11	7	5	1.8
8	7	9	0.11	0.11	8	1	0.9
9	7	10	0.08	0.11	9	0.6	-0.5
10	1	11	0.11	0.11	10	4.5	-1.7
11	11	12	0.09	0.12	11	1	0.9
12	11	13	0.08	0.11	12	1	-1.1
13	13	14	0.04	0.04	13	1	0.9
14	3	9	0.04	0.04	14	2.1	-0.8
15	8	12	0.04	0.04			
16	5	14	0.09	0.12			

7.1.3 Red de 16 nudos (Ali Abur)

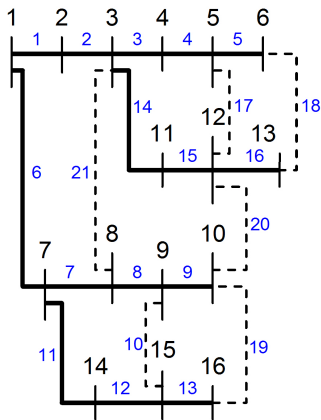


Figura 11 Red de 16 nudos (Ali Abur)

Tabla 28 Red de 16 nudos (Ali Abur)

Nº rama	Nudo origen	Nudo destino	R(pu)	X(pu)	Nudo	P (MW)	Q (MVar)
1	1	2	0.0083	0.008	1	0	0
2	2	3	0.0098	0.015	2	33	18
3	3	4	0.0012	0.0066	3	41	21
4	4	5	0.0025	0.004	4	20	10
5	5	6	0.003	0.008	5	13	4
6	1	7	0.002	0.004	6	5	2
7	7	8	0.0039	0.005	7	40	20
8	8	9	0.0099	0.0175	8	50	22
9	9	10	0.0069	0.0099	9	21	16
10	9	15	0.0058	0.0098	10	5	2
11	7	14	0.0048	0.008	11	25	15
12	14	15	0.0081	0.018	12	77	24
13	15	16	0.0032	0.0074	13	18	2.3
14	3	11	0.0069	0.0169	14	10.5	5.3
15	11	12	0.0078	0.011	15	22	5
16	12	13	0.0054	0.016	16	43	3
17	5	12	0.0038	0.008			
18	6	13	0.0062	0.013			
19	10	16	0.0002	0.0041			
20	10	12	0.0071	0.0147			
21	3	8	0.0024	0.0051			

7.1.4 Red de 33 nudos (Baran y Wu)

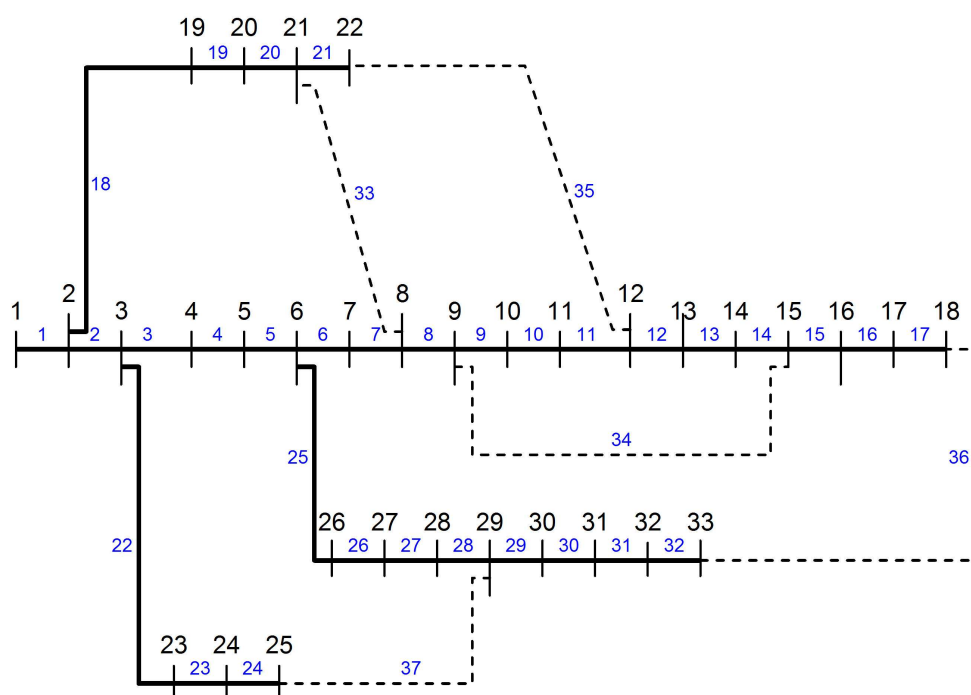


Figura 12 Red de 33 nudos (Baran y Wu)

Tabla 29 Red de 33 nudos (Baran y Wu). Parte 1 de 2

Nº rama	Nudo origen	Nudo destino	R(pu)	X(pu)	Nudo	P (MW)	Q (MVar)
1	1	2	0.092200	0.047000	1	0	0
2	2	3	0.493000	0.251100	2	0.1	0.06
3	3	4	0.366000	0.186400	3	0.09	0.04
4	4	5	0.381100	0.194100	4	0.12	0.08
5	5	6	0.819000	0.707000	5	0.06	0.03
6	6	7	0.187200	0.618800	6	0.06	0.02
7	7	8	0.711400	0.235100	7	0.2	0.1
8	8	9	1.030000	0.740000	8	0.2	0.1
9	9	10	1.044000	0.740000	9	0.06	0.02
10	10	11	0.196600	0.065000	10	0.06	0.02
11	11	12	0.374400	0.123800	11	0.045	0.03
12	12	13	1.468000	1.155000	12	0.06	0.035
13	13	14	0.541600	0.712900	13	0.06	0.035
14	14	15	0.591000	0.526000	14	0.12	0.08

Tabla 29 Red de 33 nudos (Baran y Wu). Parte 2 de 2

Nº rama	Nudo origen	Nudo destino	R(pu)	X(pu)	Nudo	P (MW)	Q (MVar)
15	15	16	0.746300	0.545000	15	0.06	0.01
16	16	17	1.289000	1.721000	16	0.06	0.02
17	17	18	0.732000	0.574000	17	0.06	0.02
18	2	19	0.164000	0.156500	18	0.09	0.04
19	19	20	1.504200	1.355400	19	0.09	0.04
20	20	21	0.409500	0.478400	20	0.09	0.04
21	21	22	0.708900	0.937300	21	0.09	0.04
22	3	23	0.451200	0.308300	22	0.09	0.04
23	23	24	0.898000	0.709100	23	0.09	0.05
24	24	25	0.896000	0.701100	24	0.42	0.2
25	6	26	0.203000	0.103400	25	0.42	0.2
26	26	27	0.284200	0.144700	26	0.06	0.025
27	27	28	1.059000	0.933700	27	0.06	0.025
28	28	29	0.804200	0.700600	28	0.06	0.02
29	29	30	0.507500	0.258500	29	0.12	0.07
30	30	31	0.974400	0.963000	30	0.2	0.6
31	31	32	0.310500	0.361900	31	0.15	0.07
32	32	33	0.341000	0.530200	32	0.21	0.1
33	8	21	2.000000	2.000000	33	0.06	0.04
34	9	15	2.000000	2.000000			
35	12	22	2.000000	2.000000			
36	18	33	0.500000	0.500000			
37	25	29	0.500000	0.500000			

7.1.5 Red de 69 nudos (Chiang y Jean Jumeau)

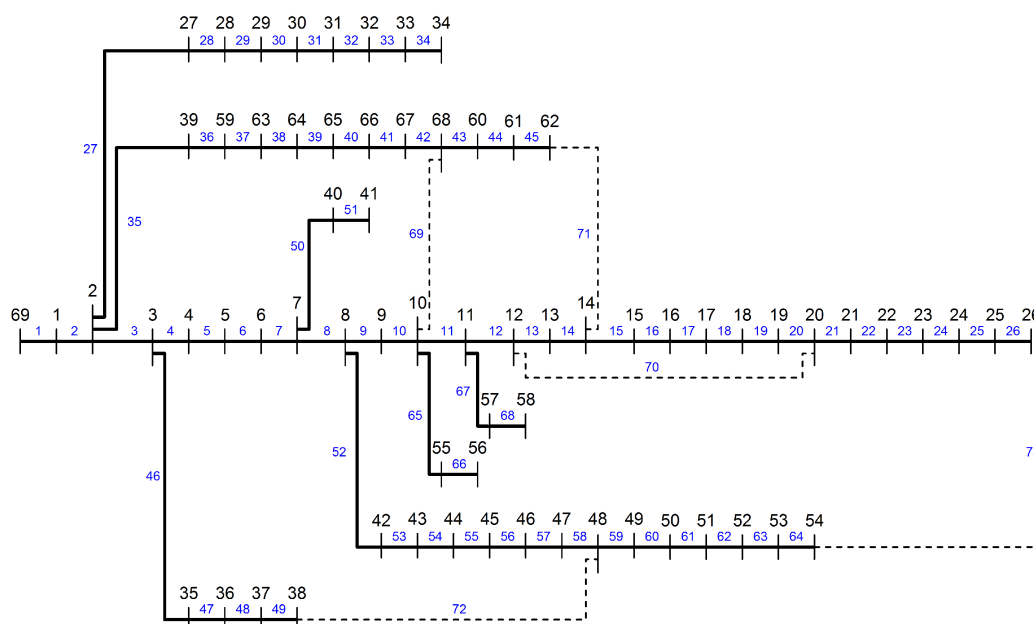


Figura 13 Red de 69 nudos (Chiang y Jean Jumeau)

Tabla 30 Red de 69 nudos (Chiang y Jean Jumeau). Parte 1 de 3

Nº rama	Nudo origen	Nudo destino	R(ohmios)	X(ohmios)	Nudo	P (MW)	Q (MVar)
1	69	1	0.001500	0.003600	1	0	0
2	1	2	0.001500	0.003600	2	0	0
3	2	3	0.004500	0.010800	3	0	0
4	3	4	0.075300	0.088200	4	0	0
5	4	5	1.098000	0.559200	5	0.000878	0.00072
6	5	6	1.143299	0.582299	6	0.013455	0.009982
7	6	7	0.276599	0.141000	7	0.024887	0.01781
8	7	8	0.147900	0.075300	8	0.01	0.0072
9	8	9	2.456993	0.812099	9	0.009333	0.006666
10	9	10	0.561599	0.185699	10	0.0485	0.034609
11	10	11	2.134198	0.705299	11	0.0485	0.034609
12	11	12	3.089985	1.019999	12	0.00271	0.001821
13	12	13	3.131994	1.034999	13	0.00271	0.001821
14	13	14	3.173986	1.048799	14	0	0

Tabla 30 Red de 69 nudos (Chiang y Jean Jumeau). Parte 2 de 3

Nº rama	Nudo origen	Nudo destino	R(ohmios)	X(ohmios)	Nudo	P (MW)	Q (MVar)
15	14	15	0.589800	0.194999	15	0.015176	0.010198
16	15	16	1.123199	0.371399	16	0.0165	0.011775
17	16	17	0.014100	0.004800	17	0.0165	0.011775
18	17	18	0.982799	0.324899	18	0	0
19	18	19	0.631800	0.208799	19	0.000316	0.000212
20	19	20	1.024799	0.338699	20	0.037983	0.0271
21	20	21	0.042000	0.013800	21	0.001762	0.001184
22	21	22	0.477299	0.157800	22	0	0
23	22	23	1.038900	0.343499	23	0.00939	0.00667
24	23	24	2.246391	0.742499	24	0	0
25	24	25	0.926699	0.306299	25	0.004667	0.00333
26	25	26	0.519599	0.171599	26	0.004667	0.00333
27	2	27	0.013200	0.032400	27	0.008667	0.006185
28	27	28	0.191999	0.469499	28	0.008667	0.006185
29	28	29	1.193399	0.394499	29	0	0
30	29	30	0.210599	0.069600	30	0	0
31	30	31	1.052999	0.348000	31	0	0
32	31	32	2.517000	0.844800	32	0.004582	0.00326
33	32	33	5.123995	1.693793	33	0.006501	0.004549
34	33	34	4.421988	1.461899	34	0.00192	0.00129
35	2	39	0.013200	0.032400	35	0	0
36	39	59	0.191999	0.469499	36	0.02635	0.0188
37	59	63	0.315900	0.368999	37	0.028226	0.091492
38	63	64	0.091200	0.106500	38	0.128226	0.091492
39	64	65	0.005400	0.006300	39	0.008667	0.006185
40	65	66	2.184893	2.552693	40	0.013512	0.009442
41	66	67	0.929999	1.086899	41	0.001202	0.000894
42	67	68	0.123000	0.143400	42	0.001449	0.001162
43	68	60	0.027600	0.034800	43	0.008788	0.006322
44	60	61	0.326699	0.411899	44	0.008	0.005708
45	61	62	0.002700	0.003600	45	0	0
46	3	35	0.010200	0.025200	46	0	0
47	35	36	0.255300	0.624899	47	0	0
48	36	37	0.869399	2.127290	48	0.000667	0.024025
49	37	38	0.246600	0.603300	49	0	0
50	7	40	0.278399	0.141900	50	0.414667	0.29591

Tabla 30 Red de 69 nudos (Chiang y Jean Jumeau). Parte 3 de 3

Nº rama	Nudo origen	Nudo destino	R(ohmios)	X(ohmios)	Nudo	P (MW)	Q (MVar)
51	40	41	0.995699	0.334199	51	0.010667	0.007612
52	8	42	0.522000	0.265799	52	0	0
53	42	43	0.608999	0.310199	53	0.07567	0.053873
54	43	44	0.852599	0.434100	54	0.01967	0.013912
55	44	45	0.843899	0.429899	55	0.006	0.004282
56	45	46	4.769994	1.601099	56	0.006	0.004282
57	46	47	2.351099	0.789000	57	0.009333	0.00666
58	47	48	0.912600	0.301799	58	0.009333	0.00666
59	48	49	1.158299	0.351600	59	0.008667	0.006185
60	49	50	1.522500	0.775500	60	0	0
61	50	51	0.292200	0.148800	61	0.003076	0.008787
62	51	52	0.434999	0.221400	62	0.003076	0.008787
63	52	53	2.131489	1.085699	63	0	0
64	53	54	3.122986	1.590599	64	0.008	0.005709
65	10	55	0.603600	0.183299	65	0.008	0.005709
66	55	56	0.014100	0.004200	66	0.000392	0.000325
67	11	57	2.218198	0.733200	67	0	0
68	57	58	0.014100	0.004800	68	0.002	0.001427
69	10	68	1.499999	1.499999	69	0	0
70	12	20	1.499999	1.499999			
71	14	62	2.999991	2.999991			
72	38	48	5.999997	5.999997			
73	26	54	2.999991	2.999991			

7.1.6 Red de 69 nudos (Das)

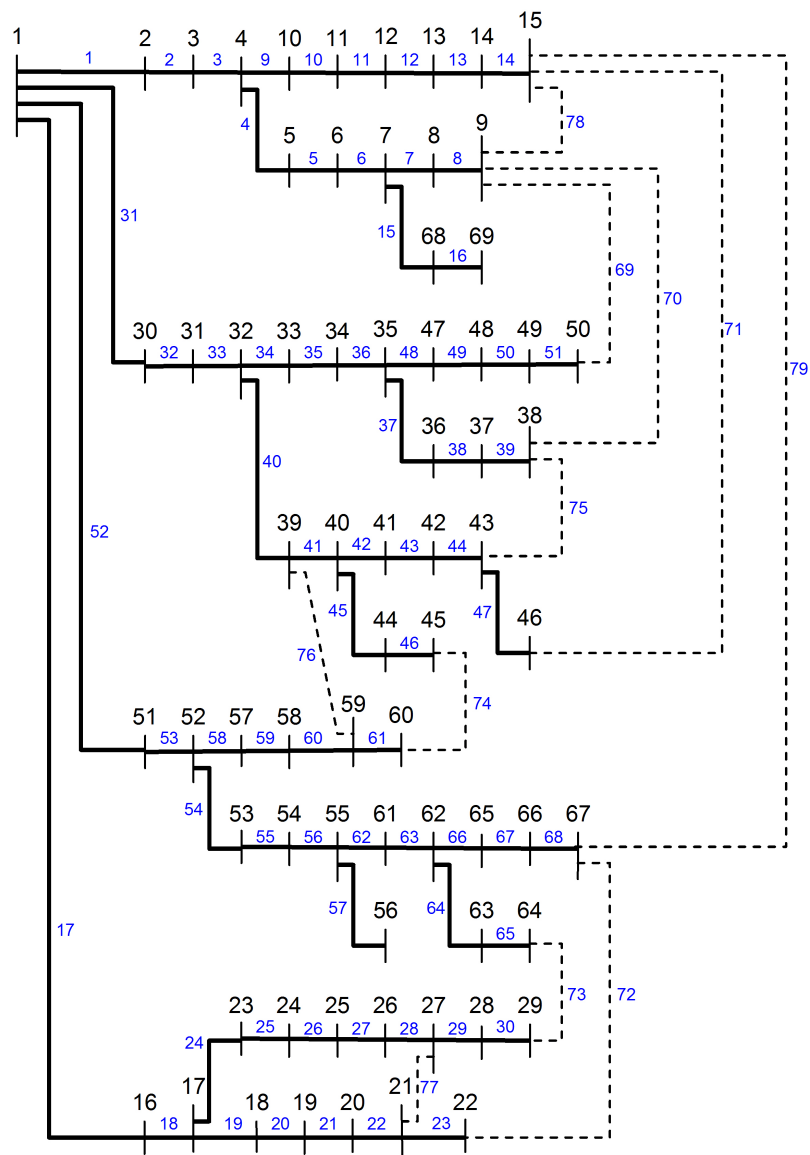


Figura 14 Red de 69 nudos (Das)

Tabla 31 Red de 69 nudos (Das). Parte 1 de 3

Nº rama	Nudo origen	Nudo destino	R(ohmios)	X(ohmios)	Nudo	P (MW)	Q (MVar)
1	1	2	1.097000	1.074000	1	0	0
2	2	3	1.463000	1.432000	2	0.1	0.09
3	3	4	0.731000	0.716000	3	0.06	0.04
4	4	5	0.366000	0.358000	4	0.15	0.13
5	5	6	1.828000	1.790000	5	0.075	0.05
6	6	7	1.097000	1.074000	6	0.015	0.009
7	7	8	0.731000	0.716000	7	0.018	0.014
8	8	9	0.731000	0.716000	8	0.013	0.01
9	4	10	1.080000	0.734000	9	0.016	0.011
10	10	11	1.620000	1.101000	10	0.02	0.01
11	11	12	1.080000	0.734000	11	0.016	0.009
12	12	13	1.350000	0.917000	12	0.05	0.04
13	13	14	0.810000	0.550000	13	0.105	0.09
14	14	15	1.944000	1.321000	14	0.025	0.015
15	7	68	1.080000	0.734000	15	0.04	0.025
16	68	69	1.620000	1.101000	16	0.06	0.03
17	1	16	1.097000	1.074000	17	0.04	0.025
18	16	17	0.366000	0.358000	18	0.015	0.009
19	17	18	1.463000	1.432000	19	0.013	0.007
20	18	19	0.914000	0.895000	20	0.03	0.02
21	19	20	0.804000	0.787000	21	0.09	0.05
22	20	21	1.133000	1.110000	22	0.05	0.03
23	21	22	0.475000	0.465000	23	0.06	0.04
24	17	23	2.214000	1.505000	24	0.1	0.08
25	23	24	1.620000	1.110000	25	0.08	0.065
26	24	25	1.080000	0.734000	26	0.1	0.06
27	25	26	0.540000	0.367000	27	0.1	0.055
28	26	27	0.540000	0.367000	28	0.12	0.07
29	27	28	1.080000	0.734000	29	0.105	0.07
30	28	29	1.080000	0.734000	30	0.08	0.05
31	1	30	0.366000	0.358000	31	0.06	0.04
32	30	31	0.731000	0.716000	32	0.013	0.008
33	31	32	0.731000	0.716000	33	0.016	0.009
34	32	33	0.804000	0.787000	34	0.05	0.03
35	33	34	1.170000	1.145000	35	0.04	0.028
36	34	35	0.768000	0.752000	36	0.06	0.04
37	35	36	0.731000	0.716000	37	0.04	0.03

Tabla 31 Red de 69 nudos (Das). Parte 2 de 3

Nº rama	Nudo origen	Nudo destino	R(ohmios)	X(ohmios)	Nudo	P (MW)	Q (MVar)
38	36	37	1.097000	1.074000	38	0.03	0.025
39	37	38	1.463000	1.432000	39	0.15	0.1
40	32	39	1.080000	0.734000	40	0.06	0.035
41	39	40	0.540000	0.367000	41	0.12	0.07
42	40	41	1.080000	0.734000	42	0.09	0.06
43	41	42	1.836000	1.248000	43	0.018	0.01
44	42	43	1.296000	0.881000	44	0.016	0.01
45	40	44	1.188000	0.807000	45	0.1	0.05
46	44	45	0.540000	0.367000	46	0.06	0.04
47	42	46	1.080000	0.734000	47	0.09	0.07
48	35	47	0.540000	0.367000	48	0.085	0.055
49	47	48	1.080000	0.734000	49	0.1	0.07
50	48	49	1.080000	0.734000	50	0.14	0.09
51	49	50	1.080000	0.734000	51	0.06	0.04
52	1	51	0.366000	0.358000	52	0.02	0.011
53	51	52	1.463000	1.432000	53	0.04	0.03
54	52	53	1.463000	1.432000	54	0.036	0.024
55	53	54	0.914000	0.895000	55	0.03	0.02
56	54	55	1.097000	1.074000	56	0.043	0.03
57	55	56	1.097000	1.074000	57	0.08	0.05
58	52	57	0.270000	0.183000	58	0.24	0.12
59	57	58	0.270000	0.183000	59	0.125	0.11
60	58	59	0.810000	0.550000	60	0.025	0.01
61	59	60	1.296000	0.881000	61	0.01	0.005
62	55	61	1.188000	0.807000	62	0.15	0.13
63	61	62	1.188000	0.807000	63	0.05	0.03
64	62	63	0.810000	0.550000	64	0.03	0.02
65	63	64	1.620000	1.101000	65	0.13	0.12
66	62	65	1.080000	0.734000	66	0.15	0.13
67	65	66	0.540000	0.367000	67	0.025	0.015
68	66	67	1.080000	0.734000	68	0.1	0.06
69	9	50	0.908000	0.726000	69	0.04	0.03
70	9	38	0.381000	0.244000			
71	15	46	0.681000	0.544000			
72	22	67	0.254000	0.203000			
73	29	64	0.254000	0.203000			

Tabla 31 Red de 69 nudos (Das). Parte 3 de 3

Nº rama	Nudo origen	Nudo destino	R(ohmios)	X(ohmios)	Nudo	P (MW)	Q (MVAr)
74	45	60	0.254000	0.203000			
75	43	38	0.454000	0.363000			
76	39	59	0.454000	0.363000			
77	21	27	0.454000	0.363000			
78	15	9	0.681000	0.544000			
79	67	15	0.454000	0.363000			

7.1.7 Red de 84 nudos (Su y Lee)

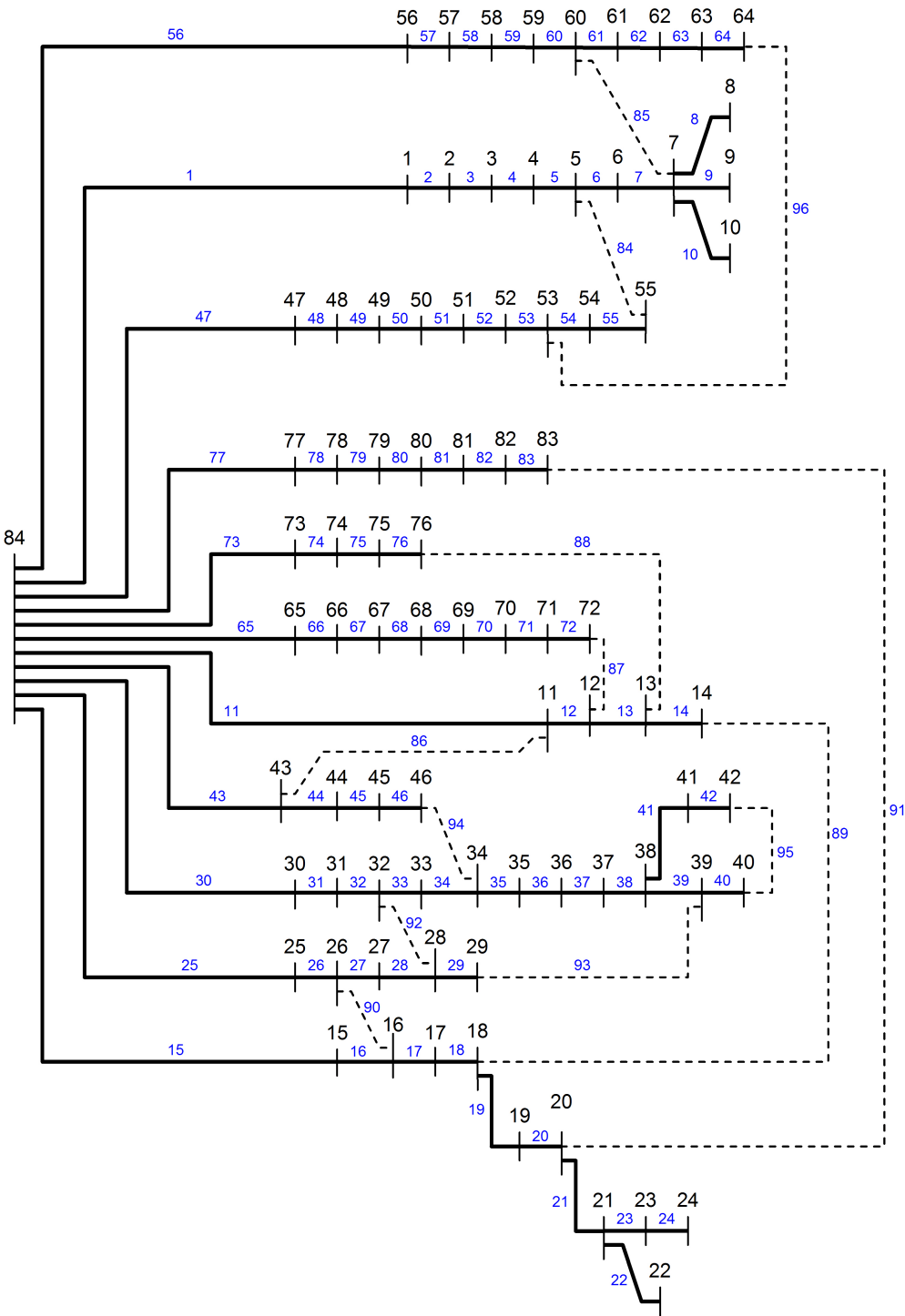


Figura 15 Red de 84 nudos (Su y Lee)

Tabla 32 Red de 84 nudos (Su y Lee). Parte 1 de 3

Nº rama	Nudo origen	Nudo destino	R(ohmios)	X(ohmios)	Nudo	P (MW)	Q (MVar)
1	84	1	0.194400	0.662400	1	0	0
2	1	2	0.209600	0.430400	2	0.1	0.05
3	2	3	0.235800	0.484200	3	0.3	0.2
4	3	4	0.091700	0.188300	4	0.35	0.25
5	4	5	0.209600	0.430400	5	0.22	0.1
6	5	6	0.039300	0.080700	6	1.1	0.8
7	6	7	0.040500	0.138000	7	0.4	0.32
8	7	8	0.104800	0.215200	8	0.3	0.2
9	7	9	0.235800	0.484200	9	0.3	0.23
10	7	10	0.104800	0.215200	10	0.3	0.26
11	84	11	0.078600	0.161400	11	0	0
12	11	12	0.340600	0.694400	12	1.2	0.8
13	12	13	0.026200	0.053800	13	0.8	0.6
14	12	14	0.078600	0.161400	14	0.7	0.5
15	84	15	0.113400	0.386400	15	0	0
16	15	16	0.052400	0.107600	16	0.3	0.15
17	16	17	0.052400	0.107600	17	0.5	0.35
18	17	18	0.157200	0.322800	18	0.7	0.4
19	18	19	0.039300	0.080700	19	1.2	1
20	19	20	0.170300	0.349700	20	0.3	0.3
21	20	21	0.235800	0.484200	21	0.4	0.35
22	21	22	0.157200	0.322800	22	0.05	0.02
23	21	23	0.196500	0.403500	23	0.05	0.02
24	23	24	0.131000	0.269000	24	0.05	0.01
25	84	25	0.056700	0.193200	25	0.05	0.03
26	25	26	0.104800	0.215200	26	0.1	0.06
27	26	27	0.248900	0.511100	27	0.1	0.07
28	27	28	0.048600	0.165600	28	1.8	1.3
29	28	29	0.131000	0.269000	29	0.2	0.12
30	84	30	0.196500	0.396000	30	0	0
31	30	31	0.131000	0.269000	31	1.8	1.6
32	31	32	0.131000	0.269000	32	0.2	0.15
33	32	33	0.026200	0.053800	33	0.2	0.1
34	33	34	0.170300	0.349700	34	0.8	0.6
35	34	35	0.052400	0.107600	35	0.1	0.06
36	35	36	0.497800	1.022200	36	0.1	0.06
37	36	37	0.039300	0.080700	37	0.02	0.01

Tabla 32 Red de 84 nudos (Su y Lee). Parte 2 de 3

Nº rama	Nudo origen	Nudo destino	R(ohmios)	X(ohmios)	Nudo	P (MW)	Q (MVar)
38	37	38	0.039300	0.080700	38	0.02	0.01
39	38	39	0.078600	0.161400	39	0.02	0.01
40	39	40	0.209600	0.430400	40	0.02	0.01
41	38	41	0.196500	0.403500	41	0.2	0.16
42	41	42	0.209600	0.430400	42	0.05	0.03
43	84	43	0.048600	0.165600	43	0	0
44	43	44	0.039300	0.080700	44	0.03	0.02
45	44	45	0.131000	0.269000	45	0.8	0.7
46	45	46	0.235800	0.484200	46	0.2	0.15
47	84	47	0.243000	0.828000	47	0	0
48	47	48	0.065500	0.134500	48	0	0
49	48	49	0.065500	0.134500	49	0	0
50	49	50	0.039300	0.080700	50	0.2	0.16
51	50	51	0.078600	0.161400	51	0.8	0.6
52	51	52	0.039300	0.080700	52	0.5	0.3
53	52	53	0.078600	0.161400	53	0.5	0.35
54	53	54	0.052400	0.107600	54	0.5	0.3
55	54	55	0.131000	0.269000	55	0.2	0.08
56	84	56	0.226800	0.772800	56	0	0
57	56	57	0.537100	1.102900	57	0.03	0.02
58	57	58	0.052400	0.107600	58	0.6	0.42
59	58	59	0.040500	0.138000	59	0	0
60	59	60	0.039300	0.080700	60	0.02	0.01
61	60	61	0.026200	0.053800	61	0.02	0.01
62	61	62	0.104800	0.215200	62	0.2	0.13
63	62	63	0.235800	0.484200	63	0.3	0.24
64	63	64	0.024300	0.082800	64	0.3	0.2
65	84	65	0.048600	0.165600	65	0	0
66	65	66	0.170300	0.349700	66	0.05	0.03
67	66	67	0.121500	0.414000	67	0	0
68	67	68	0.218700	0.745200	68	0.4	0.36
69	68	69	0.048600	0.165600	69	0	0
70	69	70	0.072900	0.248400	70	0	0
71	70	71	0.056700	0.193200	71	2	1.5
72	71	72	0.026200	0.052800	72	0.2	0.15
73	84	73	0.324000	1.104000	73	0	0

Tabla 32 Red de 84 nudos (Su y Lee). Parte 3 de 3

Nº rama	Nudo origen	Nudo destino	R(ohmios)	X(ohmios)	Nudo	P (MW)	Q (MVAr)
74	73	74	0.032400	0.110400	74	0	0
75	74	75	0.056700	0.193200	75	1.2	0.95
76	75	76	0.048600	0.165600	76	0.3	0.18
77	84	77	0.251100	0.855600	77	0	0
78	77	78	0.129600	0.441600	78	0.4	0.36
79	78	79	0.048600	0.165600	79	2	1.3
80	79	80	0.131000	0.264000	80	0.2	0.14
81	80	81	0.131000	0.264000	81	0.5	0.36
82	81	82	0.091700	0.188300	82	0.1	0.03
83	82	83	0.314400	0.645600	83	0.4	0.36
84	5	55	0.131000	0.269000	84	0	0
85	7	60	0.131000	0.269000			
86	11	43	0.131000	0.269000			
87	12	72	0.340600	0.699400			
88	13	76	0.458500	0.941500			
89	14	18	0.537100	1.082400			
90	16	26	0.091700	0.188300			
91	20	83	0.078600	0.161400			
92	28	32	0.052400	0.107600			
93	29	39	0.078600	0.161400			
94	34	46	0.026200	0.053800			
95	40	42	0.196500	0.403500			
96	53	64	0.039300	0.080700			

7.1.8 Red de 118 nudos (Zhang)

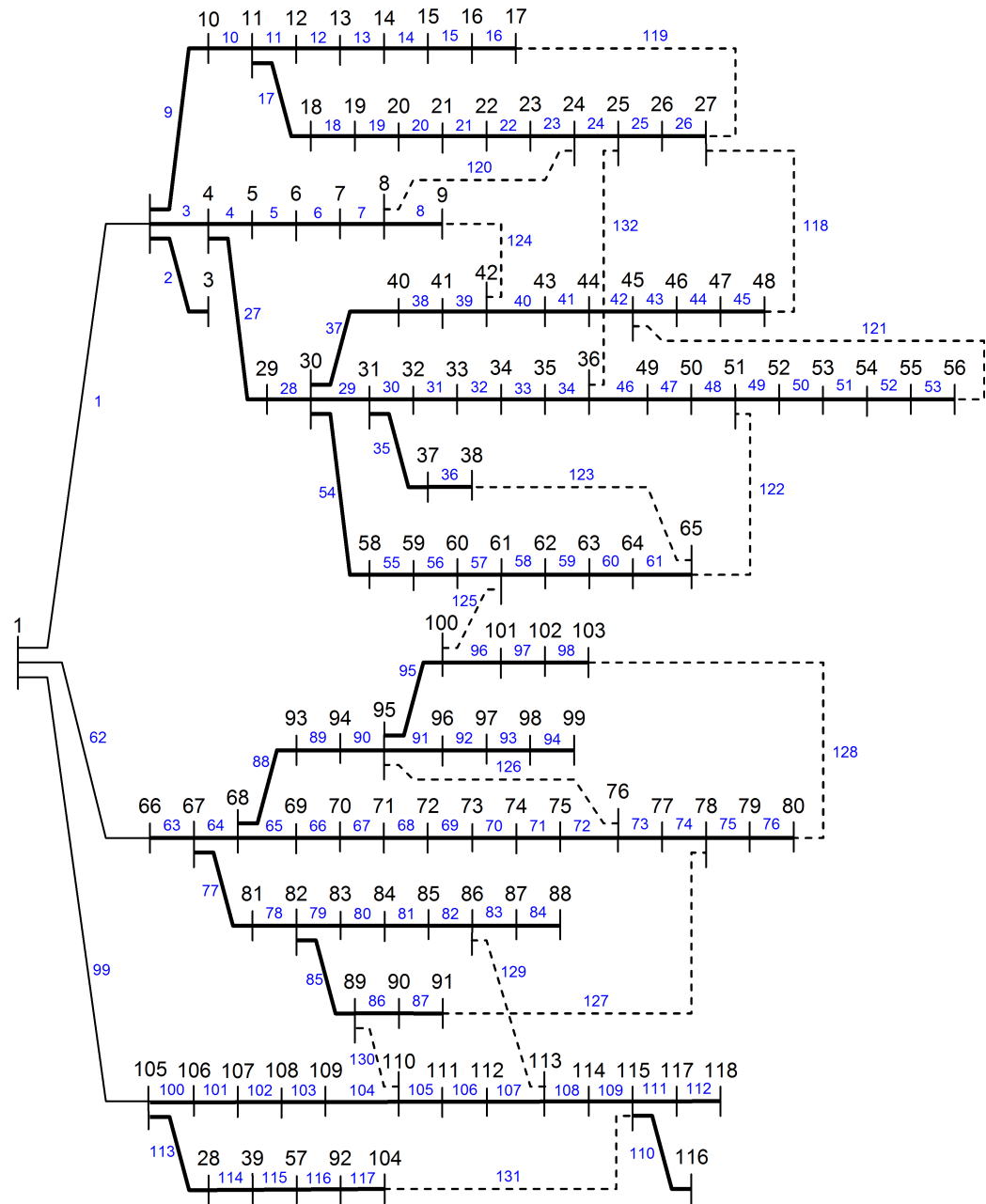


Figura 16 Red de 118 nudos (Zhang)

Tabla 33 Red de 118 nudos (Zhang). Parte 1 de 4

Nº rama	Nudo origen	Nudo destino	R(ohmios)	X(ohmios)	Nudo	P (MW)	Q (MVar)
1	1	2	0.036000	0.012960	1	0	0
2	2	3	0.033000	0.011880	2	0.13384	0.10114
3	2	4	0.045000	0.016200	3	0.016214	0.011292
4	4	5	0.015000	0.054000	4	0.034315	0.021845
5	5	6	0.015000	0.054000	5	0.073016	0.063602
6	6	7	0.015000	0.012500	6	0.1442	0.068604
7	7	8	0.018000	0.014000	7	0.10447	0.061725
8	8	9	0.021000	0.063000	8	0.028547	0.011503
9	2	10	0.166000	0.134400	9	0.08756	0.051073
10	10	11	0.112000	0.078900	10	0.1982	0.10677
11	11	12	0.187000	0.313000	11	0.1468	0.075995
12	12	13	0.142000	0.151200	12	0.02604	0.018687
13	13	14	0.180000	0.118000	13	0.0521	0.02322
14	14	15	0.150000	0.045000	14	0.1419	0.1175
15	15	16	0.160000	0.180000	15	0.02187	0.02879
16	16	17	0.157000	0.171000	16	0.03337	0.02645
17	11	18	0.218000	0.285000	17	0.03243	0.02523
18	18	19	0.118000	0.185000	18	0.020234	0.011906
19	19	20	0.160000	0.196000	19	0.15694	0.078523
20	20	21	0.120000	0.189000	20	0.54629	0.3514
21	21	22	0.120000	0.078900	21	0.18031	0.1642
22	22	23	1.410000	0.723000	22	0.093167	0.05459
23	23	24	0.293000	0.134800	23	0.08518	0.03965
24	24	25	0.133000	0.104000	24	0.1681	0.09517
25	25	26	0.178000	0.134000	25	0.12511	0.15022
26	26	27	0.178000	0.134000	26	0.01603	0.02462
27	4	29	0.015000	0.029600	27	0.02603	0.02462
28	29	30	0.012000	0.027600	28	0.21114	0.1929
29	30	31	0.120000	0.276600	29	0.59456	0.52262
30	31	32	0.210000	0.243000	30	0.12062	0.05911
31	32	33	0.120000	0.054000	31	0.10238	0.09955
32	33	34	0.178000	0.234000	32	0.5134	0.3185
33	34	35	0.178000	0.234000	33	0.47525	0.45614
34	35	36	0.154000	0.162000	34	0.15143	0.13679
35	31	37	0.187000	0.261000	35	0.20538	0.0833
36	37	38	0.133000	0.099000	36	0.1316	0.09308
37	30	40	0.330000	0.194000	37	0.4484	0.36979

Tabla 33 Red de 118 nudos (Zhang). Parte 2 de 4

Nº rama	Nudo origen	Nudo destino	R(ohmios)	X(ohmios)	Nudo	P (MW)	Q (MVar)
38	40	41	0.310000	0.194000	38	0.44052	0.32164
39	41	42	0.130000	0.194000	39	0.067009	0.053336
40	42	43	0.280000	0.150000	40	0.11254	0.05513
41	43	44	1.180000	0.850000	41	0.053963	0.038998
42	44	45	0.420000	0.243600	42	0.39305	0.3426
43	45	46	0.270000	0.097200	43	0.32674	0.27856
44	46	47	0.339000	0.122100	44	0.53626	0.24024
45	47	48	0.270000	0.177900	45	0.076247	0.066562
46	36	49	0.210000	0.138300	46	0.05352	0.03976
47	49	50	0.120000	0.078900	47	0.040328	0.031964
48	50	51	0.150000	0.098700	48	0.039653	0.020758
49	51	52	0.150000	0.098700	49	0.066195	0.042361
50	52	53	0.240000	0.158100	50	0.073904	0.051653
51	53	54	0.120000	0.078900	51	0.11477	0.057965
52	54	55	0.405000	0.145800	52	0.91837	1.2051
53	55	56	0.405000	0.145800	53	0.2103	0.14666
54	30	58	0.391000	0.141000	54	0.06668	0.056608
55	58	59	0.406000	0.146100	55	0.042207	0.040184
56	59	60	0.406000	0.146100	56	0.43374	0.28341
57	60	61	0.706000	0.546100	57	0.16207	0.090321
58	61	62	0.338000	0.121800	58	0.0621	0.02686
59	62	63	0.338000	0.121800	59	0.09246	0.08838
60	63	64	0.207000	0.074700	60	0.085188	0.055436
61	64	65	0.247000	0.892200	61	0.3453	0.3324
62	1	66	0.028000	0.041800	62	0.0225	0.01683
63	66	67	0.117000	0.201600	63	0.080551	0.04915
64	67	68	0.255000	0.091800	64	0.09586	0.09075
65	68	69	0.210000	0.075900	65	0.06292	0.0477
66	69	70	0.383000	0.138000	66	0.4788	0.46374
67	70	71	0.504000	0.330300	67	0.12094	0.052
68	71	72	0.406000	0.146100	68	0.13911	0.10034
69	72	73	0.962000	0.761000	69	0.39178	0.1935
70	73	74	0.165000	0.060000	70	0.027741	0.02671
71	74	75	0.303000	0.109200	71	0.052814	0.02525
72	75	76	0.303000	0.109200	72	0.06689	0.03871
73	76	77	0.206000	0.144000	73	0.4675	0.39514

Tabla 33 Red de 118 nudos (Zhang). Parte 3 de 4

Nº rama	Nudo origen	Nudo destino	R(ohmios)	X(ohmios)	Nudo	P (MW)	Q (MVAr)
74	77	78	0.233000	0.084000	74	0.59485	0.23974
75	78	79	0.591000	0.177300	75	0.1325	0.08436
76	79	80	0.126000	0.045300	76	0.052699	0.02248
77	67	81	0.559000	0.368700	77	0.86979	0.61477
78	81	82	0.186000	0.122700	78	0.031349	0.02981
79	82	83	0.186000	0.122700	79	0.19239	0.12243
80	83	84	0.260000	0.139000	80	0.06575	0.04537
81	84	85	0.154000	0.148000	81	0.23815	0.22322
82	85	86	0.230000	0.128000	82	0.29455	0.16247
83	86	87	0.252000	0.106000	83	0.48557	0.43792
84	87	88	0.180000	0.148000	84	0.24353	0.18303
85	82	89	0.160000	0.182000	85	0.24353	0.18303
86	89	90	0.200000	0.230000	86	0.13425	0.11929
87	90	91	0.160000	0.393000	87	0.02271	0.02796
88	68	93	0.669000	0.241200	88	0.049513	0.02651
89	93	94	0.266000	0.122700	89	0.38378	0.25716
90	94	95	0.266000	0.122700	90	0.04964	0.0206
91	95	96	0.266000	0.122700	91	0.022473	0.0118
92	96	97	0.266000	0.122700	92	0.048785	0.029156
93	97	98	0.233000	0.115000	93	0.06293	0.04296
94	98	99	0.496000	0.138000	94	0.03067	0.03493
95	95	100	0.196000	0.180000	95	0.06253	0.06679
96	100	101	0.196000	0.180000	96	0.11457	0.08174
97	101	102	0.186600	0.122000	97	0.081292	0.06652
98	102	103	0.074600	0.318000	98	0.031733	0.01596
99	1	105	0.062500	0.026500	99	0.03332	0.06048
100	105	106	0.150100	0.234000	100	0.53128	0.22485
101	106	107	0.134700	0.088800	101	0.50703	0.36742
102	107	108	0.230700	0.120300	102	0.02639	0.0117
103	108	109	0.447000	0.160800	103	0.04599	0.03039
104	109	110	0.163200	0.058800	104	0.0339	0.01898
105	110	111	0.330000	0.099000	105	0.10066	0.04757
106	111	112	0.156000	0.056100	106	0.45648	0.3503
107	112	113	0.381900	0.137400	107	0.52256	0.44929
108	113	114	0.162600	0.058500	108	0.40843	0.16846
109	114	115	0.381900	0.137400	109	0.14148	0.13425

Tabla 33 Red de 118 nudos (Zhang). Parte 4 de 4

Nº rama	Nudo origen	Nudo destino	R(ohmios)	X(ohmios)	Nudo	P (MW)	Q (MVar)
110	115	116	0.244500	0.087900	110	0.10443	0.06602
111	115	117	0.208800	0.075300	111	0.096793	0.08364
112	117	118	0.230100	0.082800	112	0.49392	0.41934
113	105	28	0.610200	0.219600	113	0.22538	0.13588
114	28	39	0.186600	0.127000	114	0.50921	0.38721
115	39	57	0.373200	0.246000	115	0.1885	0.17346
116	57	92	0.405000	0.367000	116	0.91803	0.89855
117	92	104	0.489000	0.438000	117	0.30508	0.21537
118	48	27	0.525800	0.292500	118	0.05438	0.04097
119	17	27	0.525800	0.291600			
120	8	24	0.427200	0.153900			
121	56	45	0.480000	0.172800			
122	65	51	0.360000	0.129600			
123	38	65	0.570000	0.572000			
124	9	42	0.530000	0.334800			
125	61	100	0.395700	0.142500			
126	76	95	0.680000	0.648000			
127	91	78	0.406200	0.146400			
128	103	80	0.462600	0.167400			
129	113	86	0.651000	0.234000			
130	110	89	0.812500	0.292500			
131	115	104	0.708900	0.255300			
132	25	36	0.500000	0.500000			

7.1.9 Red de 137 nudos (Ramos et al.)

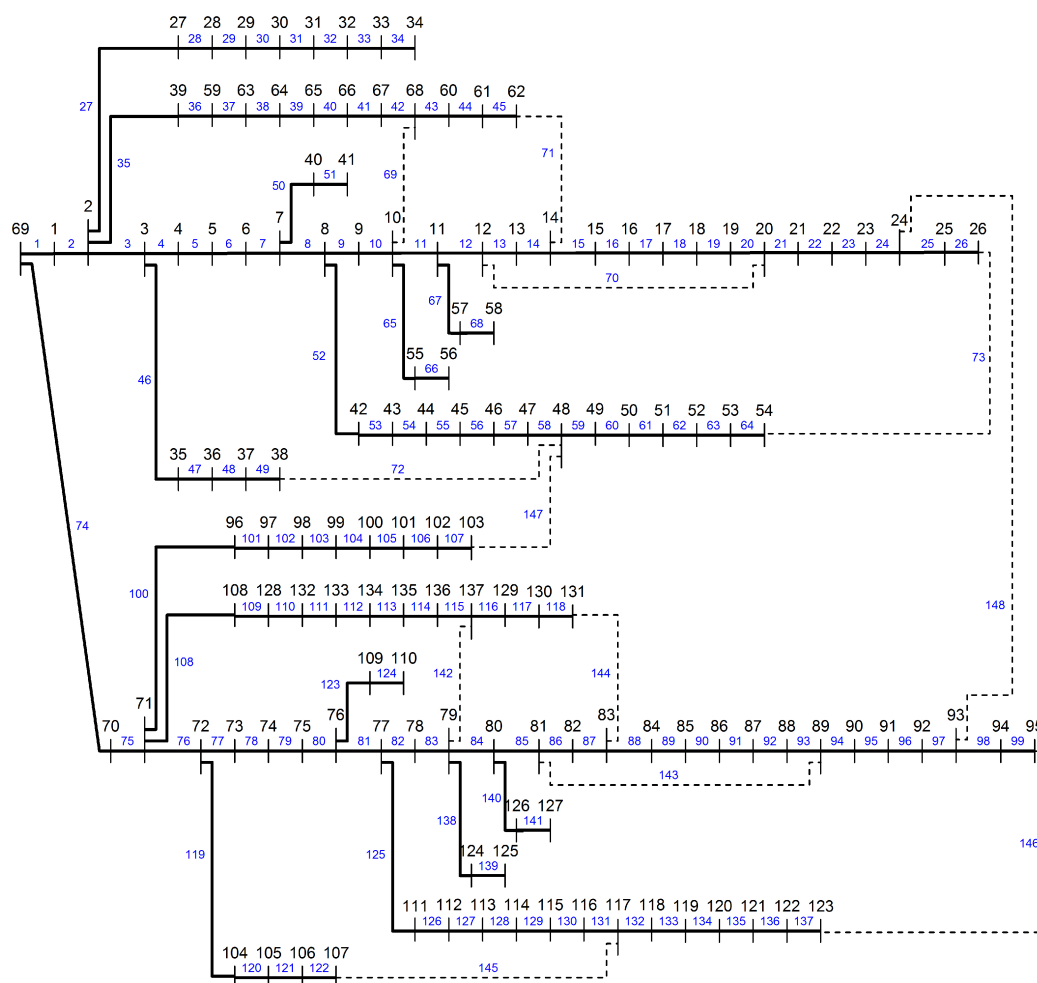


Figura 17 Red de 137 nudos (Ramos et al.)

Tabla 34 Red de 137 nudos (Ramos et al.). Parte 1 de 4

Nº rama	Nudo origen	Nudo destino	R(ohmios)	X(ohmios)	Nudo	P (MW)	Q (MVar)
1	69	1	0.001500	0.003600	1	0	0
2	1	2	0.001500	0.003600	2	0	0
3	2	3	0.004500	0.010800	3	0	0
4	3	4	0.075300	0.088200	4	0	0
5	4	5	1.098000	0.559200	5	0.000878	0.00072
6	5	6	1.143299	0.582299	6	0.013455	0.009982
7	6	7	0.276599	0.141000	7	0.024887	0.01781
8	7	8	0.147900	0.075300	8	0.01	0.007208
9	8	9	2.456993	0.812099	9	0.009333	0.006666
10	9	10	0.561599	0.185699	10	0.0485	0.034609
11	10	11	2.134198	0.705299	11	0.0485	0.034609
12	11	12	3.089985	1.019999	12	0.00271	0.001821
13	12	13	3.131994	1.034999	13	0.00271	0.001821
14	13	14	3.173986	1.048799	14	0	0
15	14	15	0.589800	0.194999	15	0.015176	0.010198
16	15	16	1.123199	0.371399	16	0.0165	0.011775
17	16	17	0.014100	0.004800	17	0.0165	0.011775
18	17	18	0.982799	0.324899	18	0	0
19	18	19	0.631800	0.208799	19	0.000316	0.000212
20	19	20	1.024799	0.338699	20	0.037983	0.0271
21	20	21	0.042000	0.013800	21	0.001762	0.001184
22	21	22	0.477299	0.157800	22	0	0
23	22	23	1.038900	0.343499	23	0.00939	0.00667
24	23	24	2.246391	0.742499	24	0	0
25	24	25	0.926699	0.306299	25	0.004667	0.00333
26	25	26	0.519599	0.171599	26	0.004667	0.00333
27	2	27	0.013200	0.032400	27	0.008667	0.006185
28	27	28	0.191999	0.469499	28	0.008667	0.006185
29	28	29	1.193399	0.394499	29	0	0
30	29	30	0.210599	0.069600	30	0	0
31	30	31	1.052999	0.348000	31	0	0
32	31	32	2.517000	0.844800	32	0.004582	0.00326
33	32	33	5.123995	1.693793	33	0.006501	0.004549
34	33	34	4.421988	1.461899	34	0.00192	0.00129
35	2	39	0.013200	0.032400	35	0	0
36	39	59	0.191999	0.469499	36	0.02635	0.0188
37	59	63	0.315900	0.368999	37	0.028226	0.091492

Tabla 34 Red de 137 nudos (Ramos et al.). Parte 2 de 4

Nº rama	Nudo origen	Nudo destino	R(ohmios)	X(ohmios)	Nudo	P (MW)	Q (MVar)
38	63	64	0.091200	0.106500	38	0.128226	0.091492
39	64	65	0.005400	0.006300	39	0.008667	0.006185
40	65	66	2.184893	2.552693	40	0.013512	0.009442
41	66	67	0.929999	1.086899	41	0.001202	0.000894
42	67	68	0.123000	0.143400	42	0.001449	0.001162
43	68	60	0.027600	0.034800	43	0.008787	0.006322
44	60	61	0.326699	0.411899	44	0.008	0.005708
45	61	62	0.002700	0.003600	45	0	0
46	3	35	0.010200	0.025200	46	0	0
47	35	36	0.255300	0.624899	47	0	0
48	36	37	0.869399	2.127290	48	0.000667	0.024025
49	37	38	0.246600	0.603300	49	0	0
50	7	40	0.278399	0.141900	50	0.414667	0.29591
51	40	41	0.995699	0.334199	51	0.010667	0.007612
52	8	42	0.522000	0.265799	52	0	0
53	42	43	0.608999	0.310199	53	0.07567	0.053873
54	43	44	0.852599	0.434100	54	0.01967	0.013912
55	44	45	0.843899	0.429899	55	0.006	0.004282
56	45	46	4.769994	1.601099	56	0.006	0.004282
57	46	47	2.351099	0.789000	57	0.009333	0.00666
58	47	48	0.912600	0.301799	58	0.009333	0.00666
59	48	49	1.158299	0.351600	59	0.008667	0.006185
60	49	50	1.522500	0.775500	60	0	0
61	50	51	0.292200	0.148800	61	0.003076	0.008787
62	51	52	0.434999	0.221400	62	0.003076	0.008787
63	52	53	2.131489	1.085699	63	0	0
64	53	54	3.122986	1.590599	64	0.008	0.005709
65	10	55	0.603600	0.183299	65	0.008	0.005709
66	55	56	0.014100	0.004200	66	0.000392	0.000325
67	11	57	2.218198	0.733200	67	0	0
68	57	58	0.014100	0.004800	68	0.002	0.001427
69	10	68	1.499999	1.499999	69	0	0
70	12	20	1.499999	1.499999	70	0	0
71	14	62	2.999991	2.999991	71	0	0
72	38	48	5.999997	5.999997	72	0	0
73	26	54	2.999991	2.999991	73	0	0
74	69	70	0.001500	0.003600	74	0.000878	0.00072

Tabla 34 Red de 137 nudos (Ramos et al.). Parte 3 de 4

Nº rama	Nudo origen	Nudo destino	R(ohmios)	X(ohmios)	Nudo	P (MW)	Q (MVar)
75	70	71	0.001500	0.003600	75	0.013455	0.009982
76	71	72	0.004500	0.010800	76	0.024887	0.01781
77	72	73	0.075300	0.088200	77	0.01	0.007208
78	73	74	1.098000	0.559200	78	0.009333	0.006666
79	74	75	1.143299	0.582299	79	0.0485	0.034609
80	75	76	0.276599	0.141000	80	0.0485	0.034609
81	76	77	0.147900	0.075300	81	0.00271	0.001821
82	77	78	2.456993	0.812099	82	0.00271	0.001821
83	78	79	0.561599	0.185699	83	0	0
84	79	80	2.134198	0.705299	84	0.015176	0.010198
85	80	81	3.089985	1.019999	85	0.0165	0.011775
86	81	82	3.131994	1.034999	86	0.0165	0.011775
87	82	83	3.173986	1.048799	87	0	0
88	83	84	0.589800	0.194999	88	0.000316	0.000212
89	84	85	1.123199	0.371399	89	0.037983	0.0271
90	85	86	0.014100	0.004800	90	0.001762	0.001184
91	86	87	0.982799	0.324899	91	0	0
92	87	88	0.631800	0.208799	92	0.00939	0.00667
93	88	89	1.024799	0.338699	93	0	0
94	89	90	0.042000	0.013800	94	0.004667	0.00333
95	90	91	0.477299	0.157800	95	0.004667	0.00333
96	91	92	1.038900	0.343499	96	0.008667	0.006185
97	92	93	2.246391	0.742499	97	0.008667	0.006185
98	93	94	0.926699	0.306299	98	0	0
99	94	95	0.519599	0.171599	99	0	0
100	71	96	0.013200	0.032400	100	0	0
101	96	97	0.191999	0.469499	101	0.004582	0.00326
102	97	98	1.193399	0.394499	102	0.006501	0.004549
103	98	99	0.210599	0.069600	103	0.00192	0.00129
104	99	100	1.052999	0.348000	104	0	0
105	100	101	2.517000	0.844800	105	0.02635	0.0188
106	101	102	5.123995	1.693793	106	0.028226	0.091492
107	102	103	4.421988	1.461899	107	0.128226	0.091492
108	71	108	0.013200	0.032400	108	0.008667	0.006185
109	108	128	0.191999	0.469499	109	0.013512	0.009442
110	128	132	0.315900	0.368999	110	0.001202	0.000894
111	132	133	0.091200	0.106500	111	0.001449	0.001162

Tabla 34 Red de 137 nudos (Ramos et al.). Parte 4 de 4

Nº rama	Nudo origen	Nudo destino	R(ohmios)	X(ohmios)	Nudo	P (MW)	Q (MVar)
112	133	134	0.005400	0.006300	112	0.008787	0.006322
113	134	135	2.184893	2.552693	113	0.008	0.005708
114	135	136	0.929999	1.086899	114	0	0
115	136	137	0.123000	0.143400	115	0	0
116	137	129	0.027600	0.034800	116	0	0
117	129	130	0.326699	0.411899	117	0.000667	0.024025
118	130	131	0.002700	0.003600	118	0	0
119	72	104	0.010200	0.025200	119	0.414667	0.29591
120	104	105	0.255300	0.624899	120	0.010667	0.007612
121	105	106	0.869399	2.127290	121	0	0
122	106	107	0.246600	0.603300	122	0.07567	0.053873
123	76	109	0.278399	0.141900	123	0.01967	0.013912
124	109	110	0.995699	0.334199	124	0.006	0.004282
125	77	111	0.522000	0.265799	125	0.006	0.004282
126	111	112	0.608999	0.310199	126	0.009333	0.00666
127	112	113	0.852599	0.434100	127	0.009333	0.00666
128	113	114	0.843899	0.429899	128	0.008667	0.006185
129	114	115	4.769994	1.601099	129	0	0
130	115	116	2.351099	0.789000	130	0.003076	0.008787
131	116	117	0.912600	0.301799	131	0.003076	0.008787
132	117	118	1.158299	0.351600	132	0	0
133	118	119	1.522500	0.775500	133	0.008	0.005709
134	119	120	0.292200	0.148800	134	0.008	0.005709
135	120	121	0.434999	0.221400	135	0.000392	0.000325
136	121	122	2.131489	1.085699	136	0	0
137	122	123	3.122986	1.590599	137	0.002	0.001427
138	79	124	0.603600	0.183299			
139	124	125	0.014100	0.004200			
140	80	126	2.218198	0.733200			
141	126	127	0.014100	0.004800			
142	79	137	1.499999	1.499999			
143	81	89	1.499999	1.499999			
144	83	131	2.999991	2.999991			
145	107	117	5.999997	5.999997			
146	95	123	2.999991	2.999991			
147	48	103	0.000000	0.016028			
148	24	93	0.000000	0.016028			

7.1.10 Red de 205 nudos (Ramos et al.)

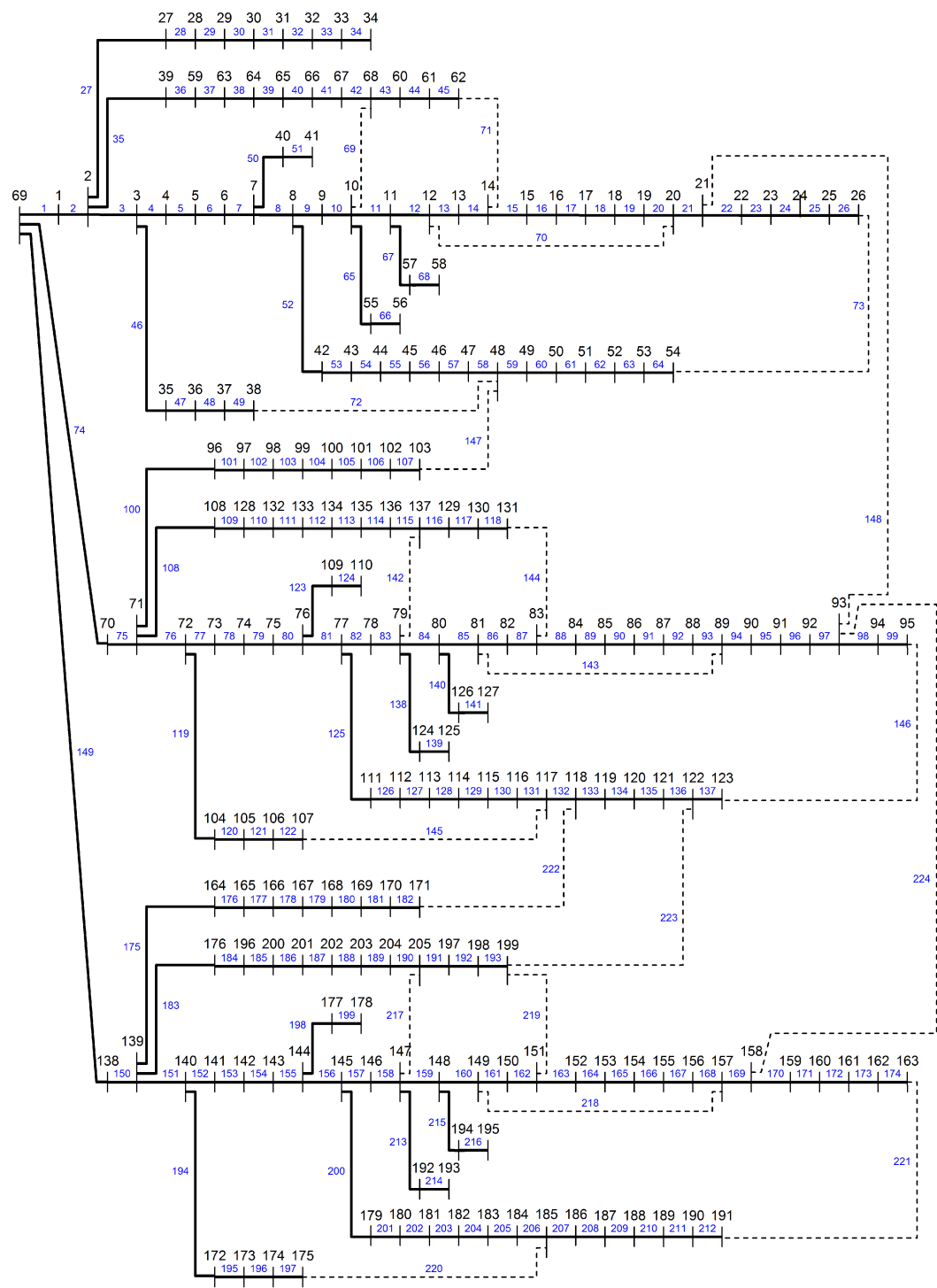


Figura 18 Red de 205 nudos (Ramos et al.)

Tabla 35 Red de 205 nudos (Ramos et al.).Parte 1 de 7

Nº rama	Nudo origen	Nudo destino	R(ohmios)	X(ohmios)	Nudo	P (MW)	Q (MVar)
1	69	1	0.001500	0.003600	1	0	0
2	1	2	0.001500	0.003600	2	0	0
3	2	3	0.004500	0.010800	3	0	0
4	3	4	0.075300	0.088200	4	0	0
5	4	5	1.098000	0.559200	5	0.000878	0.00072
6	5	6	1.143299	0.582299	6	0.013455	0.009982
7	6	7	0.276599	0.141000	7	0.024887	0.01781
8	7	8	0.147900	0.075300	8	0.01	0.007208
9	8	9	2.456993	0.812099	9	0.009333	0.006666
10	9	10	0.561599	0.185699	10	0.0485	0.034609
11	10	11	2.134198	0.705299	11	0.0485	0.034609
12	11	12	3.089985	1.019999	12	0.00271	0.001821
13	12	13	3.131994	1.034999	13	0.00271	0.001821
14	13	14	3.173986	1.048799	14	0	0
15	14	15	0.589800	0.194999	15	0.015176	0.010198
16	15	16	1.123199	0.371399	16	0.0165	0.011775
17	16	17	0.014100	0.004800	17	0.0165	0.011775
18	17	18	0.982799	0.324899	18	0	0
19	18	19	0.631800	0.208799	19	0.000316	0.000212
20	19	20	1.024799	0.338699	20	0.037983	0.0271
21	20	21	0.042000	0.013800	21	0.001762	0.001184
22	21	22	0.477299	0.157800	22	0	0
23	22	23	1.038900	0.343499	23	0.00939	0.00667
24	23	24	2.246391	0.742499	24	0	0
25	24	25	0.926699	0.306299	25	0.004667	0.00333
26	25	26	0.519599	0.171599	26	0.004667	0.00333
27	2	27	0.013200	0.032400	27	0.008667	0.006185
28	27	28	0.191999	0.469499	28	0.008667	0.006185
29	28	29	1.193399	0.394499	29	0	0
30	29	30	0.210599	0.069600	30	0	0
31	30	31	1.052999	0.348000	31	0	0
32	31	32	2.517000	0.844800	32	0.004582	0.00326
33	32	33	5.123995	1.693793	33	0.006501	0.004549
34	33	34	4.421988	1.461899	34	0.00192	0.00129
35	2	39	0.013200	0.032400	35	0	0
36	39	59	0.191999	0.469499	36	0.02635	0.0188
37	59	63	0.315900	0.368999	37	0.028226	0.091492

Tabla 35 Red de 205 nudos (Ramos et al.).Parte 2 de 7

Nº rama	Nudo origen	Nudo destino	R(ohmios)	X(ohmios)	Nudo	P (MW)	Q (MVar)
38	63	64	0.091200	0.106500	38	0.128226	0.091492
39	64	65	0.005400	0.006300	39	0.008667	0.006185
40	65	66	2.184893	2.552693	40	0.013512	0.009442
41	66	67	0.929999	1.086899	41	0.001202	0.000894
42	67	68	0.123000	0.143400	42	0.001449	0.001162
43	68	60	0.027600	0.034800	43	0.008787	0.006322
44	60	61	0.326699	0.411899	44	0.008	0.005708
45	61	62	0.002700	0.003600	45	0	0
46	3	35	0.010200	0.025200	46	0	0
47	35	36	0.255300	0.624899	47	0	0
48	36	37	0.869399	2.127290	48	0.000667	0.024025
49	37	38	0.246600	0.603300	49	0	0
50	7	40	0.278399	0.141900	50	0.414667	0.29591
51	40	41	0.995699	0.334199	51	0.010667	0.007612
52	8	42	0.522000	0.265799	52	0	0
53	42	43	0.608999	0.310199	53	0.07567	0.053873
54	43	44	0.852599	0.434100	54	0.01967	0.013912
55	44	45	0.843899	0.429899	55	0.006	0.004282
56	45	46	4.769994	1.601099	56	0.006	0.004282
57	46	47	2.351099	0.789000	57	0.009333	0.00666
58	47	48	0.912600	0.301799	58	0.009333	0.00666
59	48	49	1.158299	0.351600	59	0.008667	0.006185
60	49	50	1.522500	0.775500	60	0	0
61	50	51	0.292200	0.148800	61	0.003076	0.008787
62	51	52	0.434999	0.221400	62	0.003076	0.008787
63	52	53	2.131489	1.085699	63	0	0
64	53	54	3.122986	1.590599	64	0.008	0.005709
65	10	55	0.603600	0.183299	65	0.008	0.005709
66	55	56	0.014100	0.004200	66	0.000392	0.000325
67	11	57	2.218198	0.733200	67	0	0
68	57	58	0.014100	0.004800	68	0.002	0.001427
69	10	68	1.499999	1.499999	69	0	0
70	12	20	1.499999	1.499999	70	0	0
71	14	62	2.999991	2.999991	71	0	0
72	38	48	5.999997	5.999997	72	0	0
73	26	54	2.999991	2.999991	73	0	0
74	69	70	0.001500	0.003600	74	0.000878	0.00072

Tabla 35 Red de 205 nudos (Ramos et al.).Parte 3 de 7

Nº rama	Nudo origen	Nudo destino	R(ohmios)	X(ohmios)	Nudo	P (MW)	Q (MVar)
75	70	71	0.001500	0.003600	75	0.013455	0.009982
76	71	72	0.004500	0.010800	76	0.024887	0.01781
77	72	73	0.075300	0.088200	77	0.01	0.007208
78	73	74	1.098000	0.559200	78	0.009333	0.006666
79	74	75	1.143299	0.582299	79	0.0485	0.034609
80	75	76	0.276599	0.141000	80	0.0485	0.034609
81	76	77	0.147900	0.075300	81	0.00271	0.001821
82	77	78	2.456993	0.812099	82	0.00271	0.001821
83	78	79	0.561599	0.185699	83	0	0
84	79	80	2.134198	0.705299	84	0.015176	0.010198
85	80	81	3.089985	1.019999	85	0.0165	0.011775
86	81	82	3.131994	1.034999	86	0.0165	0.011775
87	82	83	3.173986	1.048799	87	0	0
88	83	84	0.589800	0.194999	88	0.000316	0.000212
89	84	85	1.123199	0.371399	89	0.037983	0.0271
90	85	86	0.014100	0.004800	90	0.001762	0.001184
91	86	87	0.982799	0.324899	91	0	0
92	87	88	0.631800	0.208799	92	0.00939	0.00667
93	88	89	1.024799	0.338699	93	0	0
94	89	90	0.042000	0.013800	94	0.004667	0.00333
95	90	91	0.477299	0.157800	95	0.004667	0.00333
96	91	92	1.038900	0.343499	96	0.008667	0.006185
97	92	93	2.246391	0.742499	97	0.008667	0.006185
98	93	94	0.926699	0.306299	98	0	0
99	94	95	0.519599	0.171599	99	0	0
100	71	96	0.013200	0.032400	100	0	0
101	96	97	0.191999	0.469499	101	0.004582	0.00326
102	97	98	1.193399	0.394499	102	0.006501	0.004549
103	98	99	0.210599	0.069600	103	0.00192	0.00129
104	99	100	1.052999	0.348000	104	0	0
105	100	101	2.517000	0.844800	105	0.02635	0.0188
106	101	102	5.123995	1.693793	106	0.028226	0.091492
107	102	103	4.421988	1.461899	107	0.128226	0.091492
108	71	108	0.013200	0.032400	108	0.008667	0.006185
109	108	128	0.191999	0.469499	109	0.013512	0.009442
110	128	132	0.315900	0.368999	110	0.001202	0.000894
111	132	133	0.091200	0.106500	111	0.001449	0.001162

Tabla 35 Red de 205 nudos (Ramos et al.).Parte 4 de 7

Nº rama	Nudo origen	Nudo destino	R(ohmios)	X(ohmios)	Nudo	P (MW)	Q (MVar)
112	133	134	0.005400	0.006300	112	0.008787	0.006322
113	134	135	2.184893	2.552693	113	0.008	0.005708
114	135	136	0.929999	1.086899	114	0	0
115	136	137	0.123000	0.143400	115	0	0
116	137	129	0.027600	0.034800	116	0	0
117	129	130	0.326699	0.411899	117	0.000667	0.024025
118	130	131	0.002700	0.003600	118	0	0
119	72	104	0.010200	0.025200	119	0.414667	0.29591
120	104	105	0.255300	0.624899	120	0.010667	0.007612
121	105	106	0.869399	2.127290	121	0	0
122	106	107	0.246600	0.603300	122	0.07567	0.053873
123	76	109	0.278399	0.141900	123	0.01967	0.013912
124	109	110	0.995699	0.334199	124	0.006	0.004282
125	77	111	0.522000	0.265799	125	0.006	0.004282
126	111	112	0.608999	0.310199	126	0.009333	0.00666
127	112	113	0.852599	0.434100	127	0.009333	0.00666
128	113	114	0.843899	0.429899	128	0.008667	0.006185
129	114	115	4.769994	1.601099	129	0	0
130	115	116	2.351099	0.789000	130	0.003076	0.008787
131	116	117	0.912600	0.301799	131	0.003076	0.008787
132	117	118	1.158299	0.351600	132	0	0
133	118	119	1.522500	0.775500	133	0.008	0.005709
134	119	120	0.292200	0.148800	134	0.008	0.005709
135	120	121	0.434999	0.221400	135	0.000392	0.000325
136	121	122	2.131489	1.085699	136	0	0
137	122	123	3.122986	1.590599	137	0.002	0.001427
138	79	124	0.603600	0.183299	138	0	0
139	124	125	0.014100	0.004200	139	0	0
140	80	126	2.218198	0.733200	140	0	0
141	126	127	0.014100	0.004800	141	0	0
142	79	137	1.499999	1.499999	142	0.000878	0.00072
143	81	89	1.499999	1.499999	143	0.013455	0.009982
144	83	131	2.999991	2.999991	144	0.024887	0.01781
145	107	117	5.999997	5.999997	145	0.01	0.007208
146	95	123	2.999991	2.999991	146	0.009333	0.006666
147	48	103	0.000000	0.016028	147	0.0485	0.034609
148	21	93	0.000000	0.016028	148	0.0485	0.034609

Tabla 35 Red de 205 nudos (Ramos et al.).Parte 5 de 7

Nº rama	Nudo origen	Nudo destino	R(ohmios)	X(ohmios)	Nudo	P (MW)	Q (MVar)
149	69	138	0.001500	0.003600	149	0.00271	0.001821
150	138	139	0.001500	0.003600	150	0.00271	0.001821
151	139	140	0.004500	0.010800	151	0	0
152	140	141	0.075300	0.088200	152	0.015176	0.010198
153	141	142	1.098000	0.559200	153	0.0165	0.011775
154	142	143	1.143299	0.582299	154	0.0165	0.011775
155	143	144	0.276599	0.141000	155	0	0
156	144	145	0.147900	0.075300	156	0.000316	0.000212
157	145	146	2.456993	0.812099	157	0.037983	0.0271
158	146	147	0.561599	0.185699	158	0.001762	0.001184
159	147	148	2.134198	0.705299	159	0	0
160	148	149	3.089985	1.019999	160	0.00939	0.00667
161	149	150	3.131994	1.034999	161	0	0
162	150	151	3.173986	1.048799	162	0.004667	0.00333
163	151	152	0.589800	0.194999	163	0.004667	0.00333
164	152	153	1.123199	0.371399	164	0.008667	0.006185
165	153	154	0.014100	0.004800	165	0.008667	0.006185
166	154	155	0.982799	0.324899	166	0	0
167	155	156	0.631800	0.208799	167	0	0
168	156	157	1.024799	0.338699	168	0	0
169	157	158	0.042000	0.013800	169	0.004582	0.00326
170	158	159	0.477299	0.157800	170	0.006501	0.004549
171	159	160	1.038900	0.343499	171	0.00192	0.00129
172	160	161	2.246391	0.742499	172	0	0
173	161	162	0.926699	0.306299	173	0.02635	0.0188
174	162	163	0.519599	0.171599	174	0.028226	0.091492
175	139	164	0.013200	0.032400	175	0.128226	0.091492
176	164	165	0.191999	0.469499	176	0.008667	0.006185
177	165	166	1.193399	0.394499	177	0.013512	0.009442
178	166	167	0.210599	0.069600	178	0.001202	0.000894
179	167	168	1.052999	0.348000	179	0.001449	0.001162
180	168	169	2.517000	0.844800	180	0.008787	0.006322
181	169	170	5.123995	1.693793	181	0.008	0.005708
182	170	171	4.421988	1.461899	182	0	0
183	139	176	0.013200	0.032400	183	0	0
184	176	196	0.191999	0.469499	184	0	0
185	196	200	0.315900	0.368999	185	0.000667	0.024025

Tabla 35 Red de 205 nudos (Ramos et al.).Parte 6 de 7

Nº rama	Nudo origen	Nudo destino	R(ohmios)	X(ohmios)	Nudo	P (MW)	Q (MVar)
186	200	201	0.091200	0.106500	186	0	0
187	201	202	0.005400	0.006300	187	0.414667	0.29591
188	202	203	2.184893	2.552693	188	0.010667	0.007612
189	203	204	0.929999	1.086899	189	0	0
190	204	205	0.123000	0.143400	190	0.07567	0.053873
191	205	197	0.027600	0.034800	191	0.01967	0.013912
192	197	198	0.326699	0.411899	192	0.006	0.004282
193	198	199	0.002700	0.003600	193	0.006	0.004282
194	140	172	0.010200	0.025200	194	0.009333	0.00666
195	172	173	0.255300	0.624899	195	0.009333	0.00666
196	173	174	0.869399	2.127290	196	0.008667	0.006185
197	174	175	0.246600	0.603300	197	0	0
198	144	177	0.278399	0.141900	198	0.003076	0.008787
199	177	178	0.995699	0.334199	199	0.003076	0.008787
200	145	179	0.522000	0.265799	200	0	0
201	179	180	0.608999	0.310199	201	0.008	0.005709
202	180	181	0.852599	0.434100	202	0.008	0.005709
203	181	182	0.843899	0.429899	203	0.000392	0.000325
204	182	183	4.769994	1.601099	204	0	0
205	183	184	2.351099	0.789000	205	0.002	0.001427
206	184	185	0.912600	0.301799			
207	185	186	1.158299	0.351600			
208	186	187	1.522500	0.775500			
209	187	188	0.292200	0.148800			
210	188	189	0.434999	0.221400			
211	189	190	2.131489	1.085699			
212	190	191	3.122986	1.590599			
213	147	192	0.603600	0.183299			
214	192	193	0.014100	0.004200			
215	148	194	2.218198	0.733200			
216	194	195	0.014100	0.004800			
217	147	205	1.499999	1.499999			
218	149	157	1.499999	1.499999			
219	151	199	2.999991	2.999991			
220	175	185	5.999997	5.999997			
221	163	191	2.999991	2.999991			
222	118	171	0.000000	0.016028			

Tabla 35 Red de 205 nudos (Ramos et al.).Parte 7 de 7

Nº rama	Nudo origen	Nudo destino	R(ohmios)	X(ohmios)	Nudo	P (MW)	Q (MVar)
223	122	199	0.016028	0.032055			
224	93	158	0.016028	0.032055			

7.1.11 Red de 273 nudos

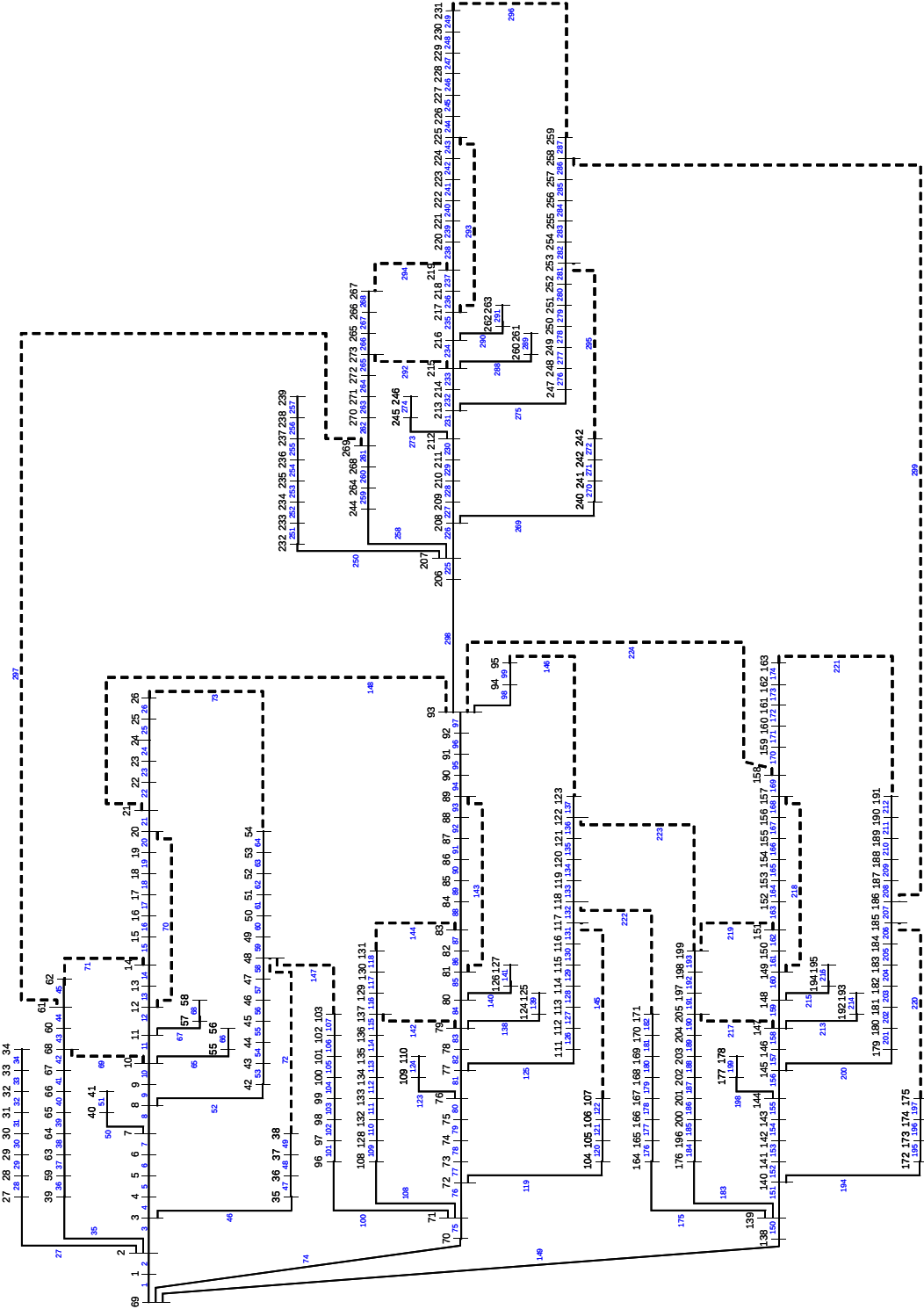


Figura 19 Red de 273 nudos

Tabla 36 Red de 273 nudos. Parte 1 de 9

Nº rama	Nudo origen	Nudo destino	R(ohmios)	X(ohmios)	Nudo	P (MW)	Q (MVar)
1	69	1	0.001500	0.003600	1	0	0
2	1	2	0.001500	0.003600	2	0	0
3	2	3	0.004500	0.010800	3	0	0
4	3	4	0.075300	0.088200	4	0	0
5	4	5	1.098000	0.559200	5	0.000878	0.00072
6	5	6	1.143299	0.582299	6	0.013455	0.009982
7	6	7	0.276599	0.141000	7	0.024887	0.01781
8	7	8	0.147900	0.075300	8	0.01	0.007208
9	8	9	2.456993	0.812099	9	0.009333	0.006666
10	9	10	0.561599	0.185699	10	0.0485	0.034609
11	10	11	2.134198	0.705299	11	0.0485	0.034609
12	11	12	3.089985	1.019999	12	0.00271	0.001821
13	12	13	3.131994	1.034999	13	0.00271	0.001821
14	13	14	3.173986	1.048799	14	0	0
15	14	15	0.589800	0.194999	15	0.015176	0.010198
16	15	16	1.123199	0.371399	16	0.0165	0.011775
17	16	17	0.014100	0.004800	17	0.0165	0.011775
18	17	18	0.982799	0.324899	18	0	0
19	18	19	0.631800	0.208799	19	0.000316	0.000212
20	19	20	1.024799	0.338699	20	0.037983	0.0271
21	20	21	0.042000	0.013800	21	0.001762	0.001184
22	21	22	0.477299	0.157800	22	0	0
23	22	23	1.038900	0.343499	23	0.00939	0.00667
24	23	24	2.246391	0.742499	24	0	0
25	24	25	0.926699	0.306299	25	0.004667	0.00333
26	25	26	0.519599	0.171599	26	0.004667	0.00333
27	2	27	0.013200	0.032400	27	0.008667	0.006185
28	27	28	0.191999	0.469499	28	0.008667	0.006185
29	28	29	1.193399	0.394499	29	0	0
30	29	30	0.210599	0.069600	30	0	0
31	30	31	1.052999	0.348000	31	0	0
32	31	32	2.517000	0.844800	32	0.004582	0.00326
33	32	33	5.123995	1.693793	33	0.006501	0.004549
34	33	34	4.421988	1.461899	34	0.00192	0.00129
35	2	39	0.013200	0.032400	35	0	0
36	39	59	0.191999	0.469499	36	0.02635	0.0188
37	59	63	0.315900	0.368999	37	0.028226	0.091492

Tabla 36 Red de 273 nudos. Parte 2 de 9

Nº rama	Nudo origen	Nudo destino	R(ohmios)	X(ohmios)	Nudo	P (MW)	Q (MVar)
38	63	64	0.091200	0.106500	38	0.128226	0.091492
39	64	65	0.005400	0.006300	39	0.008667	0.006185
40	65	66	2.184893	2.552693	40	0.013512	0.009442
41	66	67	0.929999	1.086899	41	0.001202	0.000894
42	67	68	0.123000	0.143400	42	0.001449	0.001162
43	68	60	0.027600	0.034800	43	0.008787	0.006322
44	60	61	0.326699	0.411899	44	0.008	0.005708
45	61	62	0.002700	0.003600	45	0	0
46	3	35	0.010200	0.025200	46	0	0
47	35	36	0.255300	0.624899	47	0	0
48	36	37	0.869399	2.127290	48	0.000667	0.024025
49	37	38	0.246600	0.603300	49	0	0
50	7	40	0.278399	0.141900	50	0.414667	0.29591
51	40	41	0.995699	0.334199	51	0.010667	0.007612
52	8	42	0.522000	0.265799	52	0	0
53	42	43	0.608999	0.310199	53	0.07567	0.053873
54	43	44	0.852599	0.434100	54	0.01967	0.013912
55	44	45	0.843899	0.429899	55	0.006	0.004282
56	45	46	4.769994	1.601099	56	0.006	0.004282
57	46	47	2.351099	0.789000	57	0.009333	0.00666
58	47	48	0.912600	0.301799	58	0.009333	0.00666
59	48	49	1.158299	0.351600	59	0.008667	0.006185
60	49	50	1.522500	0.775500	60	0	0
61	50	51	0.292200	0.148800	61	0.003076	0.008787
62	51	52	0.434999	0.221400	62	0.003076	0.008787
63	52	53	2.131489	1.085699	63	0	0
64	53	54	3.122986	1.590599	64	0.008	0.005709
65	10	55	0.603600	0.183299	65	0.008	0.005709
66	55	56	0.014100	0.004200	66	0.000392	0.000325
67	11	57	2.218198	0.733200	67	0	0
68	57	58	0.014100	0.004800	68	0.002	0.001427
69	10	68	1.499999	1.499999	69	0	0
70	12	20	1.499999	1.499999	70	0	0
71	14	62	2.999991	2.999991	71	0	0
72	38	48	5.999997	5.999997	72	0	0
73	26	54	2.999991	2.999991	73	0	0
74	69	70	0.001500	0.003600	74	0.000878	0.00072

Tabla 36 Red de 273 nudos. Parte 3 de 9

Nº rama	Nudo origen	Nudo destino	R(ohmios)	X(ohmios)	Nudo	P (MW)	Q (MVar)
75	70	71	0.001500	0.003600	75	0.013455	0.009982
76	71	72	0.004500	0.010800	76	0.024887	0.01781
77	72	73	0.075300	0.088200	77	0.01	0.007208
78	73	74	1.098000	0.559200	78	0.009333	0.006666
79	74	75	1.143299	0.582299	79	0.0485	0.034609
80	75	76	0.276599	0.141000	80	0.0485	0.034609
81	76	77	0.147900	0.075300	81	0.00271	0.001821
82	77	78	2.456993	0.812099	82	0.00271	0.001821
83	78	79	0.561599	0.185699	83	0	0
84	79	80	2.134198	0.705299	84	0.015176	0.010198
85	80	81	3.089985	1.019999	85	0.0165	0.011775
86	81	82	3.131994	1.034999	86	0.0165	0.011775
87	82	83	3.173986	1.048799	87	0	0
88	83	84	0.589800	0.194999	88	0.000316	0.000212
89	84	85	1.123199	0.371399	89	0.037983	0.0271
90	85	86	0.014100	0.004800	90	0.001762	0.001184
91	86	87	0.982799	0.324899	91	0	0
92	87	88	0.631800	0.208799	92	0.00939	0.00667
93	88	89	1.024799	0.338699	93	0	0
94	89	90	0.042000	0.013800	94	0.004667	0.00333
95	90	91	0.477299	0.157800	95	0.004667	0.00333
96	91	92	1.038900	0.343499	96	0.008667	0.006185
97	92	93	2.246391	0.742499	97	0.008667	0.006185
98	93	94	0.926699	0.306299	98	0	0
99	94	95	0.519599	0.171599	99	0	0
100	71	96	0.013200	0.032400	100	0	0
101	96	97	0.191999	0.469499	101	0.004582	0.00326
102	97	98	1.193399	0.394499	102	0.006501	0.004549
103	98	99	0.210599	0.069600	103	0.00192	0.00129
104	99	100	1.052999	0.348000	104	0	0
105	100	101	2.517000	0.844800	105	0.02635	0.0188
106	101	102	5.123995	1.693793	106	0.028226	0.091492
107	102	103	4.421988	1.461899	107	0.128226	0.091492
108	71	108	0.013200	0.032400	108	0.008667	0.006185
109	108	128	0.191999	0.469499	109	0.013512	0.009442
110	128	132	0.315900	0.368999	110	0.001202	0.000894
111	132	133	0.091200	0.106500	111	0.001449	0.001162

Tabla 36 Red de 273 nudos. Parte 4 de 9

Nº rama	Nudo origen	Nudo destino	R(ohmios)	X(ohmios)	Nudo	P (MW)	Q (MVar)
112	133	134	0.005400	0.006300	112	0.008787	0.006322
113	134	135	2.184893	2.552693	113	0.008	0.005708
114	135	136	0.929999	1.086899	114	0	0
115	136	137	0.123000	0.143400	115	0	0
116	137	129	0.027600	0.034800	116	0	0
117	129	130	0.326699	0.411899	117	0.000667	0.024025
118	130	131	0.002700	0.003600	118	0	0
119	72	104	0.010200	0.025200	119	0.414667	0.29591
120	104	105	0.255300	0.624899	120	0.010667	0.007612
121	105	106	0.869399	2.127290	121	0	0
122	106	107	0.246600	0.603300	122	0.07567	0.053873
123	76	109	0.278399	0.141900	123	0.01967	0.013912
124	109	110	0.995699	0.334199	124	0.006	0.004282
125	77	111	0.522000	0.265799	125	0.006	0.004282
126	111	112	0.608999	0.310199	126	0.009333	0.00666
127	112	113	0.852599	0.434100	127	0.009333	0.00666
128	113	114	0.843899	0.429899	128	0.008667	0.006185
129	114	115	4.769994	1.601099	129	0	0
130	115	116	2.351099	0.789000	130	0.003076	0.008787
131	116	117	0.912600	0.301799	131	0.003076	0.008787
132	117	118	1.158299	0.351600	132	0	0
133	118	119	1.522500	0.775500	133	0.008	0.005709
134	119	120	0.292200	0.148800	134	0.008	0.005709
135	120	121	0.434999	0.221400	135	0.000392	0.000325
136	121	122	2.131489	1.085699	136	0	0
137	122	123	3.122986	1.590599	137	0.002	0.001427
138	79	124	0.603600	0.183299	138	0	0
139	124	125	0.014100	0.004200	139	0	0
140	80	126	2.218198	0.733200	140	0	0
141	126	127	0.014100	0.004800	141	0	0
142	79	137	1.499999	1.499999	142	0.000878	0.00072
143	81	89	1.499999	1.499999	143	0.013455	0.009982
144	83	131	2.999991	2.999991	144	0.024887	0.01781
145	107	117	5.999997	5.999997	145	0.01	0.007208
146	95	123	2.999991	2.999991	146	0.009333	0.006666
147	48	103	0.000000	0.016028	147	0.0485	0.034609
148	21	93	0.000000	0.016028	148	0.0485	0.034609

Tabla 36 Red de 273 nudos. Parte 5 de 9

Nº rama	Nudo origen	Nudo destino	R(ohmios)	X(ohmios)	Nudo	P (MW)	Q (MVar)
149	69	138	0.001500	0.003600	149	0.00271	0.001821
150	138	139	0.001500	0.003600	150	0.00271	0.001821
151	139	140	0.004500	0.010800	151	0	0
152	140	141	0.075300	0.088200	152	0.015176	0.010198
153	141	142	1.098000	0.559200	153	0.0165	0.011775
154	142	143	1.143299	0.582299	154	0.0165	0.011775
155	143	144	0.276599	0.141000	155	0	0
156	144	145	0.147900	0.075300	156	0.000316	0.000212
157	145	146	2.456993	0.812099	157	0.037983	0.0271
158	146	147	0.561599	0.185699	158	0.001762	0.001184
159	147	148	2.134198	0.705299	159	0	0
160	148	149	3.089985	1.019999	160	0.00939	0.00667
161	149	150	3.131994	1.034999	161	0	0
162	150	151	3.173986	1.048799	162	0.004667	0.00333
163	151	152	0.589800	0.194999	163	0.004667	0.00333
164	152	153	1.123199	0.371399	164	0.008667	0.006185
165	153	154	0.014100	0.004800	165	0.008667	0.006185
166	154	155	0.982799	0.324899	166	0	0
167	155	156	0.631800	0.208799	167	0	0
168	156	157	1.024799	0.338699	168	0	0
169	157	158	0.042000	0.013800	169	0.004582	0.00326
170	158	159	0.477299	0.157800	170	0.006501	0.004549
171	159	160	1.038900	0.343499	171	0.00192	0.00129
172	160	161	2.246391	0.742499	172	0	0
173	161	162	0.926699	0.306299	173	0.02635	0.0188
174	162	163	0.519599	0.171599	174	0.028226	0.091492
175	139	164	0.013200	0.032400	175	0.128226	0.091492
176	164	165	0.191999	0.469499	176	0.008667	0.006185
177	165	166	1.193399	0.394499	177	0.013512	0.009442
178	166	167	0.210599	0.069600	178	0.001202	0.000894
179	167	168	1.052999	0.348000	179	0.001449	0.001162
180	168	169	2.517000	0.844800	180	0.008787	0.006322
181	169	170	5.123995	1.693793	181	0.008	0.005708
182	170	171	4.421988	1.461899	182	0	0
183	139	176	0.013200	0.032400	183	0	0
184	176	196	0.191999	0.469499	184	0	0
185	196	200	0.315900	0.368999	185	0.000667	0.024025

Tabla 36 Red de 273 nudos. Parte 6 de 9

Nº rama	Nudo origen	Nudo destino	R(ohmios)	X(ohmios)	Nudo	P (MW)	Q (MVar)
186	200	201	0.091200	0.106500	186	0	0
187	201	202	0.005400	0.006300	187	0.414667	0.29591
188	202	203	2.184893	2.552693	188	0.010667	0.007612
189	203	204	0.929999	1.086899	189	0	0
190	204	205	0.123000	0.143400	190	0.07567	0.053873
191	205	197	0.027600	0.034800	191	0.01967	0.013912
192	197	198	0.326699	0.411899	192	0.006	0.004282
193	198	199	0.002700	0.003600	193	0.006	0.004282
194	140	172	0.010200	0.025200	194	0.009333	0.00666
195	172	173	0.255300	0.624899	195	0.009333	0.00666
196	173	174	0.869399	2.127290	196	0.008667	0.006185
197	174	175	0.246600	0.603300	197	0	0
198	144	177	0.278399	0.141900	198	0.003076	0.008787
199	177	178	0.995699	0.334199	199	0.003076	0.008787
200	145	179	0.522000	0.265799	200	0	0
201	179	180	0.608999	0.310199	201	0.008	0.005709
202	180	181	0.852599	0.434100	202	0.008	0.005709
203	181	182	0.843899	0.429899	203	0.000392	0.000325
204	182	183	4.769994	1.601099	204	0	0
205	183	184	2.351099	0.789000	205	0.002	0.001427
206	184	185	0.912600	0.301799	206	0	0
207	185	186	1.158299	0.351600	207	0	0
208	186	187	1.522500	0.775500	208	0	0
209	187	188	0.292200	0.148800	209	0	0
210	188	189	0.434999	0.221400	210	0.000878	0.00072
211	189	190	2.131489	1.085699	211	0.013455	0.009982
212	190	191	3.122986	1.590599	212	0.024887	0.01781
213	147	192	0.603600	0.183299	213	0.01	0.007208
214	192	193	0.014100	0.004200	214	0.009333	0.006666
215	148	194	2.218198	0.733200	215	0.0485	0.034609
216	194	195	0.014100	0.004800	216	0.0485	0.034609
217	147	205	1.499999	1.499999	217	0.00271	0.001821
218	149	157	1.499999	1.499999	218	0.00271	0.001821
219	151	199	2.999991	2.999991	219	0	0
220	175	185	5.999997	5.999997	220	0.015176	0.010198
221	163	191	2.999991	2.999991	221	0.0165	0.011775
222	118	171	0.000000	0.016028	222	0.0165	0.011775

Tabla 36 Red de 273 nudos. Parte 7 de 9

Nº rama	Nudo origen	Nudo destino	R(ohmios)	X(ohmios)	Nudo	P (MW)	Q (MVar)
223	122	199	0.016028	0.032055	223	0	0
224	93	158	0.016028	0.032055	224	0.000316	0.000212
225	206	207	0.001500	0.003600	225	0.037983	0.0271
226	207	208	0.004500	0.010800	226	0.001762	0.001184
227	208	209	0.075300	0.088200	227	0	0
228	209	210	1.098000	0.559200	228	0.00939	0.00667
229	210	211	1.143299	0.582299	229	0	0
230	211	212	0.276599	0.141000	230	0.004667	0.00333
231	212	213	0.147900	0.075300	231	0.004667	0.00333
232	213	214	2.456993	0.812099	232	0.008667	0.006185
233	214	215	0.561599	0.185699	233	0.008667	0.006185
234	215	216	2.134198	0.705299	234	0	0
235	216	217	3.089985	1.019999	235	0	0
236	217	218	3.131994	1.034999	236	0	0
237	218	219	3.173986	1.048799	237	0.004582	0.00326
238	219	220	0.589800	0.194999	238	0.006501	0.004549
239	220	221	1.123199	0.371399	239	0.00192	0.00129
240	221	222	0.014100	0.004800	240	0	0
241	222	223	0.982799	0.324899	241	0.02635	0.0188
242	223	224	0.631800	0.208799	242	0.028226	0.091492
243	224	225	1.024799	0.338699	243	0.128226	0.091492
244	225	226	0.042000	0.013800	244	0.008667	0.006185
245	226	227	0.477299	0.157800	245	0.013512	0.009442
246	227	228	1.038900	0.343499	246	0.001202	0.000894
247	228	229	2.246391	0.742499	247	0.001449	0.001162
248	229	230	0.926699	0.306299	248	0.008787	0.006322
249	230	231	0.519599	0.171599	249	0.008	0.005708
250	207	232	0.013200	0.032400	250	0	0
251	232	233	0.191999	0.469499	251	0	0
252	233	234	1.193399	0.394499	252	0	0
253	234	235	0.210599	0.069600	253	0.000667	0.024025
254	235	236	1.052999	0.348000	254	0	0
255	236	237	2.517000	0.844800	255	0.414667	0.29591
256	237	238	5.123995	1.693793	256	0.010667	0.007612
257	238	239	4.421988	1.461899	257	0	0
258	207	244	0.013200	0.032400	258	0.07567	0.053873
259	244	264	0.191999	0.469499	259	0.01967	0.013912

Tabla 36 Red de 273 nudos. Parte 8 de 9

Nº rama	Nudo origen	Nudo destino	R(ohmios)	X(ohmios)	Nudo	P (MW)	Q (MVar)
260	264	268	0.315900	0.368999	260	0.006	0.004282
261	268	269	0.091200	0.106500	261	0.006	0.004282
262	269	270	0.005400	0.006300	262	0.009333	0.00666
263	270	271	2.184893	2.552693	263	0.009333	0.00666
264	271	272	0.929999	1.086899	264	0.008667	0.006185
265	272	273	0.123000	0.143400	265	0	0
266	273	265	0.027600	0.034800	266	0.003076	0.008787
267	265	266	0.326699	0.411899	267	0.003076	0.008787
268	266	267	0.002700	0.003600	268	0	0
269	208	240	0.010200	0.025200	269	0.008	0.005709
270	240	241	0.255300	0.624899	270	0.008	0.005709
271	241	242	0.869399	2.127290	271	0.000392	0.000325
272	242	243	0.246600	0.603300	272	0	0
273	212	245	0.278399	0.141900	273	0.002	0.001427
274	245	246	0.995699	0.334199			
275	213	247	0.522000	0.265799			
276	247	248	0.608999	0.310199			
277	248	249	0.852599	0.434100			
278	249	250	0.843899	0.429899			
279	250	251	4.769994	1.601099			
280	251	252	2.351099	0.789000			
281	252	253	0.912600	0.301799			
282	253	254	1.158299	0.351600			
283	254	255	1.522500	0.775500			
284	255	256	0.292200	0.148800			
285	256	257	0.434999	0.221400			
286	257	258	2.131489	1.085699			
287	258	259	3.122986	1.590599			
288	215	260	0.603600	0.183299			
289	260	261	0.014100	0.004200			
290	216	262	2.218198	0.733200			
291	262	263	0.014100	0.004800			
292	215	273	1.499999	1.499999			
293	217	225	1.499999	1.499999			
294	219	267	2.999991	2.999991			
295	243	253	5.999997	5.999997			
296	231	259	2.999991	2.999991			

Tabla 36 Red de 273 nudos. Parte 9 de 9

Nº rama	Nudo origen	Nudo destino	R(ohmios)	X(ohmios)	Nudo	P (MW)	Q (MVar)
297	61	269	0.016028	0.032055			
298	93	206	0.016028	0.032055			
299	186	258	0.016028	0.032055			

7.2 Tablas de resultados

Los resultados tras aplicar los diferentes algoritmos implementados a las redes de test se han ordenados por algoritmos.

Las tablas indicadas a continuación se han agrupado en cuatro partes. La primera parte corresponde con los resultados obtenidos utilizando como método de resolución de los repartos de carga, el método de Newton-Raphson. Una segunda parte presenta los datos relativos al tiempo de computación de los algoritmos.

Con el objeto de analizar la precisión de los métodos utilizados para resolver los repartos de carga, se presenta en un tercer apartado varias tablas. Y por último, una cuarta parte presenta los resultados obtenidos tras aplicar los diferentes métodos de resolución de los repartos de carga. Como información relevante se presenta la calidad de la solución mediante el índice propuesto, el número de repartos de carga y el tiempo de ejecución del algoritmo. Para cada red de test, para mayor claridad, se indica si la solución de los métodos 1 y 2 difieren frente al método de resolución de Newton-Raphson. Esta indicación aparece marcada en la tabla con un sombreado gris.

7.2.1 Tablas de resultados ordenados por algoritmo para cada red de test

En cada tabla de esta primera parte se presenta para cada red, en cada columna: la solución compuesta por las ramas abiertas, las pérdidas ($P_{\text{pérdidas}}$) de dicha solución, un índice (P_{MS}/P) para indicar respecto a la mejor solución que se posee de cada red la calidad de la solución, el número de repartos (n_{RC}) de carga realizados y por último el tiempo de computación (T_{CPU}) del algoritmo.

Estos resultados se han agrupado en cuatro grupos:

- Algoritmos mallados.
- Algoritmos radiales.
- Algoritmos híbridos.
- Algoritmos híbridos con reinicio.

Algoritmos mallados

Tabla 37 Resultados algoritmo M-01

Redes	Solución	P _{pérdidas} (kW)	P _{MS} /P	n _{RC}	T _{CPU} (s)
red10g	4-8-9-12	268.288	1	9	0.5
red14c	7-8-16	466.127	1	7	0.109
red16a	2-9-10-15-16-20	10394.1	0.99484	12	0.156
red33bw	7-9-14-32-37	139.551	1	11	0.156
red69cj	12-58-61-69-70	30.1496	0.99811	11	0.188
red69d	14-45-51-66-70-73-75-76-77-78-79	204.112	0.98677	22	0.406
red84sl	7-13-33-39-42-63-72-82-84-86-89-90-92	626.946	0.99659	27	0.578
red118z	23-26-34-39-42-51-58-71-74-76-95-109-122-129-130	874.617	0.99441	31	0.797
red137p	12-58-61-69-70-85-131-134-142-143-147-148	60.2993	0.99811	24	0.563
red205p	12-58-61-69-70-85-98-131-133-142-143-147-148-161-168-169-206-209-217-222	85.9863	0.98961	39	1.25
red273	14-20-58-63-69-86-98-131-134-142-143-147-148-161-206-209-217-218-222-224-225-233-236-281-284-287-293	197.271	0.95777	53	2.52

Tabla 38 Resultados algoritmo M-01 iterativo

Redes	Solución	P _{pérdidas} (kW)	P _{MS} /P	n _{RC}	T _{CPU} (s)
red10g	4-8-9-12	268.288	1	24	0.281
red14c	7-8-16	466.127	1	15	0.188
red16a	2-8-15-16-19-20	10340.7	0.99998	36	0.391
red33bw	7-9-14-32-37	139.551	1	35	0.438
red69cj	14-58-61-69-70	30.0928	1	35	0.594
red69d	13-30-45-51-66-70-75-76-77-78-79	201.412	1	126	2.27
red84sl	7-13-34-39-42-55-62-72-82-86-89-90-92	625.514	0.99887	195	3.92
red118z	23-26-34-39-42-51-58-71-74-95-97-109-122-129-130	869.726	1	255	6.58
red137p	14-58-61-69-70-87-131-134-142-143-147-148	60.1856	1	148	3.95
red205p	14-58-61-69-70-87-127-133-142-143-145-146-147-148-164-169-206-209-217-219	85.2276	0.99841	398	15.3
red273	16-21-45-58-63-69-87-98-131-134-142-143-147-162-206-209-217-218-222-224-225-233-237-248-281-284-293	190.576	0.99142	730	38.2

Tabla 39 Resultados algoritmo M-02

Redes	Solución	P _{pérdidas} (kW)	P _{MS} /P	n _{RC}	T _{CPU} (s)
red10g	4-8-9-12	268.288	1	12	0.141
red14c	7-8-16	466.127	1	9	0.125
red16a	2-9-10-15-16-20	10394.1	0.99484	16	0.203
red33bw	7-9-14-32-37	139.551	1	15	0.203
red69cj	12-58-61-69-70	30.1496	0.99811	15	0.281
red69d	14-30-45-51-66-70-75-76-77-78-79	201.442	0.99985	31	0.563
red84sl	7-13-33-39-42-63-72-82-84-86-89-90-92	626.946	0.99659	39	0.828
red118z	23-26-34-39-42-51-58-71-74-95-97-109-122-129-130	869.726	1	45	1.36
red137p	12-58-61-69-70-85-131-134-142-143-147-148	60.2993	0.99811	34	0.984
red205p	12-58-61-69-70-85-98-131-134-142-143-147-148-160-169-206-209-217-218-222	87.678	0.97051	58	2.95
red273	14-20-58-61-69-86-98-131-134-142-143-147-148-161-206-209-217-218-222-224-225-233-236-281-284-287-293	197.151	0.95836	77	7.5

Tabla 40 Resultados algoritmo M-02 iterativo

Redes	Solución	P _{pérdidas} (kW)	P _{MS} /P	n _{RC}	T _{CPU} (s)
red10g	4-8-9-12	268.288	1	30	0.328
red14c	7-8-16	466.127	1	18	0.203
red16a	2-8-15-16-19-20	10340.7	0.99998	46	0.563
red33bw	7-9-14-32-37	139.551	1	45	0.594
red69cj	14-58-61-69-70	30.0928	1	45	0.781
red69d	13-30-45-51-66-70-75-76-77-78-79	201.412	1	171	3.14
red84sl	7-13-34-39-42-55-62-72-82-86-89-90-92	625.514	0.99887	273	5.59
red118z	23-26-34-39-42-51-58-71-74-95-97-109-122-129-130	869.726	1	360	10.6
red137p	14-58-61-69-70-87-131-134-142-143-147-148	60.1856	1	204	6.05
red205p	14-58-61-69-70-87-98-127-133-142-143-145-147-148-164-169-206-209-217-219	85.0925	1	582	31.4
red273	16-21-45-58-61-69-87-98-127-133-142-143-145-147-162-166-206-209-217-224-225-233-235-243-281-284-293	188.957	0.99992	986	96

Tabla 41 Resultados algoritmo mallado M-02 variante 1

Redes	Solución	P _{pérdidas} (kW)	P _{MS} /P	n _{RC}	T _{CPU} (s)
red10g	4-8-9-12	268.288	1	12	0.141
red14c	7-8-16	466.127	1	9	0.125
red16a	2-9-10-15-16-20	10394.1	0.99484	16	0.219
red33bw	7-9-14-32-37	139.551	1	15	0.203
red69cj	12-58-61-69-70	30.1496	0.99811	15	0.281
red69d	14-30-45-51-66-70-75-76-77-78-79	201.442	0.99985	33	0.594
red84sl	7-13-34-39-42-63-72-82-84-86-89-90-92	625.866	0.99831	39	0.844
red118z	23-26-34-39-42-51-58-71-74-95-97-109-122-129-130	869.726	1	45	1.33
red137p	12-58-61-69-70-85-131-134-142-143-147-148	60.2993	0.99811	34	0.938
red205p	12-58-61-69-70-85-98-131-133-142-143-147-148-161-168-169-206-209-217-222	85.9863	0.98961	58	2.7
red273	14-20-58-61-69-86-98-131-134-142-143-147-148-161-206-209-217-218-222-224-225-233-236-281-284-287-293	197.151	0.95836	77	7.45

Tabla 42 Resultados algoritmo mallado M-02 variante 2

Redes	Solución	P _{pérdidas} (kW)	P _{MS} /P	n _{RC}	T _{CPU} (s)
red10g	4-8-9-12	268.288	1	12	0.156
red14c	7-8-16	466.127	1	9	0.125
red16a	2-9-10-15-16-20	10394.1	0.99484	16	0.188
red33bw	7-9-14-32-37	139.551	1	15	0.203
red69cj	12-58-61-69-70	30.1496	0.99811	15	0.266
red69d	13-28-45-51-65-67-70-75-76-78-79	204.328	0.98573	33	0.625
red84sl	7-13-33-39-42-55-62-72-82-86-89-90-92	626.594	0.99715	39	0.859
red118z	23-26-34-39-42-51-58-71-74-95-97-109-122-129-130	869.726	1	45	1.33
red137p	12-58-63-69-70-85-131-134-142-143-147-148	60.6034	0.99311	34	1.02
red205p	12-58-61-69-70-85-98-131-133-142-143-147-148-160-169-206-210-217-218-222	87.5978	0.9714	56	2.91
red273	14-21-45-58-61-69-86-98-131-134-142-143-147-161-206-211-217-218-222-224-225-233-235-243-244-281-284	190.803	0.99024	77	7.53

Tabla 43 Resultados algoritmo mallado M-02 variante 3

Redes	Solución	P _{pérdidas} (kW)	P _{MS} /P	n _{RC}	T _{CPU} (s)
red10g	4-9-11-12	279.073	0.96135	24	0.266
red14c	6-7-16	705.026	0.66115	15	0.172
red16a	2-10-15-16-19-20	10410.6	0.99326	39	0.453
red33bw	7-9-14-32-37	139.551	1	35	0.438
red69cj	10-13-61-70-72	44.2921	0.67942	35	0.594
red69d	14-45-51-67-70-73-75-76-77-78-79	204.837	0.98328	126	2.17
red84sl	7-13-33-38-42-63-71-82-84-86-89-90-92	680.841	0.9177	195	3.95
red118z	23-26-34-39-42-51-58-71-73-75-109-122-125-129-130	891.879	0.97516	255	6.7
red137p	13-58-62-69-70-72-83-86-131-134-143-148	76.5365	0.78636	154	3.98
red205p	13-58-61-69-70-86-98-131-133-142-143-147-148-161-168-169-206-209-217-222	85.9206	0.99036	386	13.3
red273	14-20-58-63-69-83-86-97-131-134-143-147-148-161-209-217-218-220-222-224-225-233-236-281-283-287-293	284.313	0.66455	748	36.6

Tabla 44 Resultados algoritmo mallado M-02 variante 4

Redes	Solución	P _{pérdidas} (kW)	P _{MS} /P	n _{RC}	T _{CPU} (s)
red10g	4-5-8-9	378.224	0.70934	24	0.266
red14c	6-7-16	705.026	0.66115	15	0.172
red16a	2-9-10-15-16-20	10394.1	0.99484	39	0.438
red33bw	7-9-14-36-37	142.165	0.98161	35	0.469
red69cj	13-61-69-70-72	45.9982	0.65422	35	0.578
red69d	14-45-51-66-70-73-75-76-77-78-79	204.112	0.98677	127	2.16
red84sl	7-13-16-28-29-33-63-71-82-84-86-89-95	759.115	0.82307	195	3.97
red118z	23-26-34-39-42-51-58-70-73-76-95-109-122-129-130	878.207	0.99034	255	6.66
red137p	13-58-63-69-70-72-83-86-131-134-143-148	76.5365	0.78636	154	3.91
red205p	13-58-62-69-70-86-98-131-132-134-142-143-147-148-158-161-168-169-206-209	98.9943	0.85957	370	13.1
red273	14-20-58-64-69-86-97-98-126-132-134-142-143-147-161-209-217-218-220-224-233-236-258-281-283-287-293	311.926	0.60572	715	37

Tabla 45 Resultados algoritmo mallado M-02 variante 5

Redes	Solución	P _{pérdidas} (kW)	P _{MS} /P	n _{RC}	T _{CPU} (s)
red10g	4-5-8-9	378.224	0.70934	24	0.219
red14c	6-7-16	705.026	0.66115	15	0.188
red16a	2-9-10-15-16-20	10394.1	0.99484	39	0.438
red33bw	7-10-14-32-37	140.279	0.99481	35	0.453
red69cj	13-61-69-70-72	45.9982	0.65422	35	0.625
red69d	14-45-51-65-67-70-75-76-77-78-79	205.585	0.9797	138	2.44
red84sl	7-33-38-42-63-71-82-84-86-88-89-90-92	709.288	0.88089	195	3.94
red118z	22-26-34-39-42-51-58-70-73-75-95-122-129-130-131	1016.77	0.85538	255	6.66
red137p	13-58-62-69-70-72-86-131-134-142-143-148	74.831	0.80429	154	3.94
red205p	13-20-58-62-69-72-86-98-131-133-142-143-148-161-168-169-206-209-217-222	102.776	0.82794	409	14.1
red273	13-20-58-64-69-86-98-131-133-142-143-147-148-161-168-209-217-220-222-224-225-233-236-283-287-293-295	299.17	0.63155	752	36.7

Tabla 46 Resultados algoritmo mallado M-03

Redes	Solución	P _{pérdidas} (kW)	P _{MS} /P	n _{RC}	T _{CPU} (s)
red10g	4-8-9-12	268.288	1	12	0.219
red14c	7-8-16	466.127	1	10	0.141
red16a	2-9-10-15-16-20	10394.1	0.99484	16	0.188
red33bw	7-9-14-32-37	139.551	1	18	0.266
red69cj	12-58-61-69-70	30.1496	0.99811	15	0.297
red69d	14-30-45-51-66-70-75-76-77-78-79	201.442	0.99985	31	0.578
red84sl	7-13-33-39-42-63-72-82-84-86-89-90-92	626.946	0.99659	39	0.828
red118z	23-26-34-39-42-51-58-71-74-95-97-109-122-129-130	869.726	1	46	1.36
red137p	12-58-61-69-70-85-131-134-142-143-147-148	60.2993	0.99811	34	0.984
red205p	12-58-61-69-70-85-98-131-134-142-143-147-148-160-169-206-209-217-218-222	87.678	0.97051	59	2.97
red273	14-20-58-61-69-86-98-131-134-142-143-147-148-161-206-209-217-218-222-224-225-233-236-281-284-287-293	197.151	0.95836	77	7.66

Tabla 47 Resultados algoritmo mallado M-03 iterativo

Redes	Solución	P _{pérdidas} (kW)	P _{MS} /P	n _{RC}	T _{CPU} (s)
red10g	4-8-9-12	268.288	1	30	0.359
red14c	7-8-16	466.127	1	24	0.313
red16a	2-8-15-16-19-20	10340.7	0.99998	49	0.578
red33bw	7-9-14-32-37	139.551	1	50	0.703
red69cj	14-58-61-69-70	30.0928	1	49	0.969
red69d	13-30-45-51-66-70-75-76-77-78-79	201.412	1	173	3.36
red84sl	7-13-34-39-42-55-62-72-83-86-89-90-92	624.808	1	276	5.88
red118z	23-26-34-39-42-51-58-71-74-95-97-109-122-129-130	869.726	1	371	11.3
red137p	14-58-61-69-70-87-131-134-142-143-147-148	60.1856	1	212	6.69
red205p	14-58-61-69-70-87-98-127-133-142-143-145-147-148-164-169-206-209-217-219	85.0925	1	604	33.4
red273	16-21-45-58-61-69-87-98-127-133-142-143-145-147-161-168-206-209-217-224-225-233-235-243-281-284-293	188.941	1	1016	99.8

Tabla 48 Resultados algoritmo mallado M-04

Redes	Solución	P _{pérdidas} (kW)	P _{MS} /P	n _{RC}	T _{CPU} (s)
red10g	4-8-9-12	268.288	1	13	0.297
red14c	7-8-16	466.127	1	13	0.891
red16a	2-9-10-15-16-20	10394.1	0.99484	23	0.266
red33bw	7-9-14-32-37	139.551	1	19	0.375
red69cj	12-58-61-69-70	30.1496	0.99811	15	0.328
red69d	14-30-45-51-66-70-75-76-77-78-79	201.442	0.99985	36	0.75
red84sl	7-13-33-39-42-63-72-83-84-86-89-90-92	626.24	0.99771	44	1.14
red118z	23-26-34-39-42-51-58-71-74-95-97-109-122-129-130	869.726	1	53	1.8
red137p	12-58-61-69-70-85-131-134-142-143-147-148	60.2993	0.99811	37	1.72
red205p	12-58-61-69-70-85-98-131-133-142-143-147-148-161-168-169-206-209-217-222	85.9863	0.98961	71	3.94
red273	14-20-58-61-69-86-98-131-134-142-143-147-148-161-206-209-217-218-222-224-225-233-236-281-284-287-293	197.151	0.95836	91	10.4

Tabla 49 Resultados algoritmo mallado M-04 iterativo

Redes	Solución	P _{pérdidas} (kW)	P _{MS} /P	n _{RC}	T _{CPU} (s)
red10g	4-8-9-12	268.288	1	31	0.359
red14c	7-8-16	466.127	1	14	0.781
red16a	2-8-15-16-19-20	10340.7	0.99998	83	1.03
red33bw	7-9-14-32-37	139.551	1	55	0.828
red69cj	14-58-61-69-70	30.0928	1	49	0.906
red69d	13-30-45-51-66-70-75-76-77-78-79	201.412	1	223	4.47
red84sl	7-13-34-39-42-55-62-72-83-86-89-90-92	624.808	1	300	7.11
red118z	23-26-34-39-42-51-58-71-74-95-97-109-122-129-130	869.726	1	426	13.8
red137p	14-58-61-69-70-87-131-134-142-143-147-148	60.1856	1	254	8.8
red205p	14-58-61-69-70-87-98-127-133-142-143-145-147-148-164-169-206-209-217-219	85.0925	1	852	46.2
red273	15-21-45-58-62-69-87-98-127-133-142-143-145-147-161-165-206-209-217-224-225-233-235-243-281-284-293	189.366	0.99775	1381	143

Algoritmos radiales

Tabla 50 Resultados algoritmo R-01

Redes	Solución	P _{pérdidas} (kW)	P _{MS} /P	n _{RC}	T _{CPU} (s)
red10g	10-11-12-13	277.127	0.9681	12	0.5
red14c	7-8-16	466.127	1	15	0.391
red16a	10-15-16-17-19-21	10340.5	1	33	0.438
red33bw	7-9-14-32-37	139.551	1	27	0.375
red69cj	14-58-61-69-70	30.0928	1	39	0.688
red69d	13-28-45-51-67-70-73-75-76-78-79	203.861	0.98799	75	1.42
red84sl	7-13-34-39-42-55-62-72-82-86-89-90-92	625.514	0.99887	117	2.41
red118z	23-33-39-42-48-50-59-71-74-95-97-109-119-129-130	876.597	0.99216	153	4.64
red137p	14-58-61-69-70-87-131-134-142-143-147-148	60.1856	1	96	3.53
red205p	14-58-61-69-70-85-131-134-137-142-143-147-148-162-206-209-217-218-222-224	87.7178	0.97007	177	9.81
red273	16-21-45-58-61-69-87-98-131-134-142-143-147-162-206-209-217-218-222-224-233-235-243-281-284-293-298	189.976	0.99455	267	27.4

Tabla 51 Resultados algoritmo radial R-01 variante 1

Redes	Solución	P _{pérdidas} (kW)	P _{MS} /P	n _{RC}	T _{CPU} (s)
red10g	10-11-12-13	277.127	0.9681	12	0.141
red14c	7-8-16	466.127	1	15	0.422
red16a	10-15-16-17-19-21	10340.5	1	27	0.328
red33bw	7-9-14-32-37	139.551	1	54	0.672
red69cj	14-58-61-69-70	30.0928	1	36	0.594
red69d	13-39-46-51-67-70-71-73-76-77-78	204.785	0.98353	72	1.41
red84sl	7-13-34-39-42-55-62-72-82-86-89-90-92	625.514	0.99887	111	2.22
red118z	21-26-32-39-42-48-51-61-71-73-76-82-109-125-130	887.585	0.97988	132	3.86
red137p	14-58-61-69-70-87-131-134-142-143-147-148	60.1856	1	87	3.09
red205p	14-58-61-69-70-85-127-133-137-142-143-145-147-148-162-166-206-209-217-224	86.017	0.98925	204	10.6
red273	16-21-45-58-61-69-87-98-127-133-142-143-145-147-161-166-206-209-217-224-225-233-235-243-281-284-293	188.944	0.99999	312	32.2

Tabla 52 Resultados algoritmo radial R-01 variante 2

Redes	Solución	P _{pérdidas} (kW)	P _{MS} /P	n _{RC}	T _{CPU} (s)
red10g	10-11-12-13	277.127	0.9681	16	0.203
red14c	7-8-16	466.127	1	18	0.469
red16a	10-15-16-17-19-21	10340.5	1	37	0.422
red33bw	7-9-14-32-37	139.551	1	32	0.453
red69cj	14-58-61-69-70	30.0928	1	44	0.766
red69d	13-28-45-51-67-70-73-75-76-78-79	203.861	0.98799	86	1.61
red84sl	7-13-34-39-42-55-62-72-82-86-89-90-92	625.514	0.99887	130	2.63
red118z	23-33-39-42-48-50-59-71-74-95-97-109-119-129-130	876.597	0.99216	168	4.98
red137p	14-58-61-69-70-87-131-134-142-143-147-148	60.1856	1	108	3.89
red205p	14-58-61-69-70-85-131-134-137-142-143-147-148-162-206-209-217-218-222-224	87.7178	0.97007	197	10.5
red273	16-21-45-58-61-69-87-98-131-134-142-143-147-162-206-209-217-218-222-224-233-235-243-281-284-293-298	189.976	0.99455	292	28.9

Tabla 53 Resultados algoritmo radial R-02

Redes	Solución	P _{pérdidas} (kW)	P _{MS} /P	n _{RC}	T _{CPU} (s)
red10g	10-11-12-13	277.127	0.9681	12	0.234
red14c	7-8-16	466.127	1	22	0.313
red16a	10-15-16-17-19-21	10340.5	1	37	0.484
red33bw	7-9-14-32-37	139.551	1	38	0.594
red69cj	14-58-61-69-70	30.0928	1	52	1.2
red69d	13-28-45-51-67-70-73-75-76-78-79	203.861	0.98799	83	1.98
red84sl	7-13-34-39-42-55-62-72-83-86-89-90-92	624.808	1	133	3.33
red118z	23-34-39-42-48-50-58-71-74-95-97-109-119-129-130	874.858	0.99413	177	6.45
red137p	14-58-61-69-70-87-131-134-142-143-147-148	60.1856	1	122	6.3
red205p	14-58-61-69-70-85-131-134-137-142-143-147-148-162-206-209-217-218-222-224	87.7178	0.97007	213	14.5
red273	16-21-45-58-61-69-87-98-131-134-142-143-147-162-206-209-217-218-222-224-225-233-235-243-281-284-293	189.976	0.99455	310	39.4

Tabla 54 Resultados algoritmo radial R-02 variante 1

Redes	Solución	P _{pérdidas} (kW)	P _{MS} /P	n _{RC}	T _{CPU} (s)
red10g	10-11-12-13	277.127	0.9681	12	0.156
red14c	7-8-16	466.127	1	22	0.281
red16a	10-15-16-17-19-21	10340.5	1	28	0.391
red33bw	7-9-14-32-37	139.551	1	75	1.08
red69cj	14-58-61-69-70	30.0928	1	48	1.14
red69d	13-39-46-51-67-70-71-73-76-77-78	204.785	0.98353	81	1.94
red84sl	7-13-34-39-42-55-62-72-83-86-89-90-92	624.808	1	126	3.16
red118z	21-26-33-39-42-48-51-61-71-73-76-82-109-125-130	887.392	0.98009	161	5.83
red137p	14-58-61-69-70-87-131-134-142-143-147-148	60.1856	1	111	6.33
red205p	14-58-61-69-70-85-127-133-137-142-143-145-147-148-161-168-206-209-217-224	85.9927	0.98953	316	18.4
red273	16-21-45-58-61-69-87-98-127-133-142-143-145-147-161-168-206-209-217-224-225-233-235-243-281-284-293	188.941	1	459	49.4

Tabla 55 Resultados algoritmo radial R-02 variante 2

Redes	Solución	P _{pérdidas} (kW)	P _{MS} /P	n _{RC}	T _{CPU} (s)
red10g	10-11-12-13	277.127	0.9681	16	0.203
red14c	7-8-16	466.127	1	31	0.406
red16a	10-15-16-17-19-21	10340.5	1	44	0.578
red33bw	7-9-14-32-37	139.551	1	49	0.781
red69cj	14-58-61-69-70	30.0928	1	64	1.58
red69d	13-28-45-51-67-70-73-75-76-78-79	203.861	0.98799	97	2.44
red84sl	7-13-34-39-42-55-62-72-83-86-89-90-92	624.808	1	151	4.06
red118z	23-34-39-42-48-50-58-71-74-95-97-109-119-129-130	874.858	0.99413	203	8.72
red137p	14-58-61-69-70-87-131-134-142-143-147-148	60.1856	1	148	9.05
red205p	14-58-61-69-70-85-131-134-137-142-143-147-148-162-206-209-217-218-222-224	87.7178	0.97007	247	26.4
red273	16-21-45-58-61-69-87-98-131-134-142-143-147-162-206-209-217-218-222-224-225-233-235-243-281-284-293	189.976	0.99455	348	71.4

Tabla 56 Resultados algoritmo radial encadenado R-01 plus R-02

Redes	Solución	P _{pérdidas} (kW)	P _{MS} /P	n _{RC}	T _{CPU} (s)
red10g	10-11-12-13	277.127	0.9681	24	0.75
red14c	7-8-16	466.127	1	30	0.859
red16a	10-15-16-17-19-21	10340.5	1	52	0.625
red33bw	7-9-14-32-37	139.551	1	47	0.703
red69cj	14-58-61-69-70	30.0928	1	58	1.11
red69d	13-28-45-51-67-70-73-75-76-78-79	203.861	0.98799	112	2.34
red84sl	7-13-34-39-42-55-62-72-83-86-89-90-92	624.808	1	190	4.25
red118z	23-34-39-42-48-50-58-71-74-95-97-109-119-129-130	874.858	0.99413	275	8.5
red137p	14-58-61-69-70-87-131-134-142-143-147-148	60.1856	1	140	5.23
red205p	14-58-61-69-70-85-131-134-137-142-143-147-148-162-206-209-217-218-222-224	87.7178	0.97007	247	14.3
red273	16-21-45-58-61-69-87-98-131-134-142-143-147-162-206-209-217-218-222-224-233-235-243-281-284-293-298	189.976	0.99455	354	37.5

Algoritmos híbridos

Tabla 57 Resultados algoritmo híbrido M-01 / R-01

Redes	Solución	P _{pérdidas} (kW)	P _{MS} /P	n _{RC}	T _{CPU} (s)
red10g	4-8-9-12	268.288	1	21	0.609
red14c	7-8-16	466.127	1	16	0.203
red16a	2-8-15-16-19-20	10340.7	0.99998	39	0.484
red33bw	7-9-14-32-37	139.551	1	26	0.359
red69cj	14-58-61-69-70	30.0928	1	32	0.609
red69d	13-30-45-51-66-70-75-76-77-78-79	201.412	1	85	1.69
red84sl	7-13-34-39-42-55-62-72-82-86-89-90-92	625.514	0.99887	138	2.92
red118z	23-26-34-39-42-51-58-71-74-95-97-109-122-129-130	869.726	1	109	3.03
red137p	14-58-61-69-70-87-131-134-142-143-147-148	60.1856	1	72	2.05
red205p	14-58-61-69-70-87-98-127-133-142-143-145-147-148-164-169-206-209-217-219	85.0925	1	168	8.63
red273	16-21-45-58-61-69-87-98-131-134-142-143-147-162-206-209-217-218-222-224-225-233-235-243-281-284-293	189.976	0.99455	281	25.1

Tabla 58 Resultados algoritmo híbrido M-01 / R-02

Redes	Solución	P _{pérdidas} (kW)	P _{MS} /P	n _{RC}	T _{CPU} (s)
red10g	4-8-9-12	268.288	1	21	0.344
red14c	7-8-16	466.127	1	22	0.359
red16a	2-8-15-16-19-20	10340.7	0.99998	46	0.594
red33bw	7-9-14-32-37	139.551	1	31	0.469
red69cj	14-58-61-69-70	30.0928	1	40	0.906
red69d	13-30-45-51-66-70-75-76-77-78-79	201.412	1	89	2.02
red84sl	7-13-34-39-42-55-62-72-83-86-89-90-92	624.808	1	156	3.83
red118z	23-26-34-39-42-51-58-71-74-95-97-109-122-129-130	869.726	1	128	4.47
red137p	14-58-61-69-70-87-131-134-142-143-147-148	60.1856	1	88	3.19
red205p	14-58-61-69-70-87-98-127-133-142-143-145-147-148-164-169-206-209-217-219	85.0925	1	178	10.5
red273	16-21-45-58-61-69-87-98-131-134-142-143-147-162-206-209-217-218-222-224-225-233-235-243-281-284-293	189.976	0.99455	303	32.3

Tabla 59 Resultados algoritmo híbrido M-02 / R-01

Redes	Solución	P _{pérdidas} (kW)	P _{MS} /P	n _{RC}	T _{CPU} (s)
red10g	4-8-9-12	268.288	1	24	0.297
red14c	7-8-16	466.127	1	18	0.219
red16a	2-8-15-16-19-20	10340.7	0.99998	43	0.5
red33bw	7-9-14-32-37	139.551	1	30	0.391
red69cj	14-58-61-69-70	30.0928	1	36	0.703
red69d	13-30-45-51-66-70-75-76-77-78-79	201.412	1	79	1.47
red84sl	7-13-34-39-42-55-62-72-82-86-89-90-92	625.514	0.99887	150	3.11
red118z	23-26-34-39-42-51-58-71-74-95-97-109-122-129-130	869.726	1	90	2.69
red137p	14-58-61-69-70-87-131-134-142-143-147-148	60.1856	1	82	2.48
red205p	14-58-61-69-70-85-97-131-134-142-143-147-148-162-166-169-206-209-217-222	86.5731	0.9829	190	9.97
red273	16-21-45-58-61-69-87-98-131-134-142-143-147-162-206-209-217-218-222-224-225-233-235-243-281-284-293	189.976	0.99455	305	30.2

Tabla 60 Resultados algoritmo híbrido M-02 / R-02

Redes	Solución	P _{pérdidas} (kW)	P _{MS} /P	n _{RC}	T _{CPU} (s)
red10g	4-8-9-12	268.288	1	24	0.359
red14c	7-8-16	466.127	1	24	0.266
red16a	2-8-15-16-19-20	10340.7	0.99998	50	0.672
red33bw	7-9-14-32-37	139.551	1	35	0.531
red69cj	14-58-61-69-70	30.0928	1	44	0.984
red69d	13-30-45-51-66-70-75-76-77-78-79	201.412	1	83	1.83
red84sl	7-13-34-39-42-55-62-72-83-86-89-90-92	624.808	1	168	4.03
red118z	23-26-34-39-42-51-58-71-74-95-97-109-122-129-130	869.726	1	101	3.45
red137p	14-58-61-69-70-87-131-134-142-143-147-148	60.1856	1	98	3.44
red205p	14-58-61-69-70-85-97-131-134-142-143-147-148-161-168-169-206-209-217-222	86.5666	0.98297	254	15.6
red273	16-21-45-58-61-69-87-98-131-134-142-143-147-162-206-209-217-218-222-224-225-233-235-243-281-284-293	189.976	0.99455	330	36.9

Tabla 61 Resultados algoritmo híbrido M-03 / R-01

Redes	Solución	P _{pérdidas} (kW)	P _{MS} /P	n _{RC}	T _{CPU} (s)
red10g	4-8-9-12	268.288	1	24	0.297
red14c	7-8-16	466.127	1	19	0.25
red16a	2-8-15-16-19-20	10340.7	0.99998	43	0.5
red33bw	7-9-14-32-37	139.551	1	33	0.469
red69cj	14-58-61-69-70	30.0928	1	36	0.719
red69d	13-30-45-51-66-70-75-76-77-78-79	201.412	1	79	1.55
red84sl	7-13-34-39-42-55-62-72-82-86-89-90-92	625.514	0.99887	150	3.11
red118z	23-26-34-39-42-51-58-71-74-95-97-109-122-129-130	869.726	1	91	2.8
red137p	14-58-61-69-70-87-131-134-142-143-147-148	60.1856	1	82	2.44
red205p	14-58-61-69-70-85-97-131-134-142-143-147-148-162-166-169-206-209-217-222	86.5731	0.9829	191	10
red273	16-21-45-58-61-69-87-98-131-134-142-143-147-162-206-209-217-218-222-224-225-233-235-243-281-284-293	189.976	0.99455	305	30.7

Tabla 62 Resultados algoritmo híbrido M-03 / R-02

Redes	Solución	P _{pérdidas} (kW)	P _{MS} /P	n _{RC}	T _{CPU} (s)
red10g	4-8-9-12	268.288	1	24	0.281
red14c	7-8-16	466.127	1	25	0.313
red16a	2-8-15-16-19-20	10340.7	0.99998	50	0.656
red33bw	7-9-14-32-37	139.551	1	38	0.578
red69cj	14-58-61-69-70	30.0928	1	44	1.03
red69d	13-30-45-51-66-70-75-76-77-78-79	201.412	1	83	1.83
red84sl	7-13-34-39-42-55-62-72-83-86-89-90-92	624.808	1	168	4
red118z	23-26-34-39-42-51-58-71-74-95-97-109-122-129-130	869.726	1	102	3.48
red137p	14-58-61-69-70-87-131-134-142-143-147-148	60.1856	1	98	3.58
red205p	14-58-61-69-70-85-97-131-134-142-143-147-148-161-168-169-206-209-217-222	86.5666	0.98297	255	15.6
red273	16-21-45-58-61-69-87-98-131-134-142-143-147-162-206-209-217-218-222-224-225-233-235-243-281-284-293	189.976	0.99455	330	37.5

Tabla 63 Resultados algoritmo híbrido M-04 / R-01

Redes	Solución	P _{pérdidas} (kW)	P _{MS} /P	n _{RC}	T _{CPU} (s)
red10g	4-8-9-12	268.288	1	25	0.406
red14c	7-8-16	466.127	1	22	0.891
red16a	2-8-15-16-19-20	10340.7	0.99998	50	0.656
red33bw	7-9-14-32-37	139.551	1	34	0.547
red69cj	14-58-61-69-70	30.0928	1	36	0.703
red69d	13-30-45-51-66-70-75-76-77-78-79	201.412	1	84	1.69
red84sl	7-13-34-39-42-55-62-72-83-86-89-90-92	624.808	1	155	3.44
red118z	23-26-34-39-42-51-58-71-74-95-97-109-122-129-130	869.726	1	98	3.17
red137p	14-58-61-69-70-87-131-134-142-143-147-148	60.1856	1	85	3.39
red205p	14-58-61-69-70-87-98-127-133-142-143-145-147-148-164-169-206-209-217-219	85.0925	1	200	10.6
red273	16-21-45-58-61-69-87-98-131-134-142-143-147-162-206-209-217-218-222-224-225-233-235-243-281-284-293	189.976	0.99455	319	32.6

Tabla 64 Resultados algoritmo híbrido M-04 / R-02

Redes	Solución	P _{pérdidas} (kW)	P _{MS} /P	n _{RC}	T _{CPU} (s)
red10g	4-8-9-12	268.288	1	25	0.328
red14c	7-8-16	466.127	1	28	0.781
red16a	2-8-15-16-19-20	10340.7	0.99998	57	0.75
red33bw	7-9-14-32-37	139.551	1	39	0.625
red69cj	14-58-61-69-70	30.0928	1	44	1.02
red69d	13-30-45-51-66-70-75-76-77-78-79	201.412	1	88	2.03
red84sl	7-13-34-39-42-55-62-72-83-86-89-90-92	624.808	1	173	4.33
red118z	23-26-34-39-42-51-58-71-74-95-97-109-122-129-130	869.726	1	109	3.88
red137p	14-58-61-69-70-87-131-134-142-143-147-148	60.1856	1	101	4.69
red205p	14-58-61-69-70-87-98-127-133-142-143-145-147-148-164-169-206-209-217-219	85.0925	1	210	12.8
red273	16-21-45-58-61-69-87-98-131-134-142-143-147-162-206-209-217-218-222-224-225-233-235-243-281-284-293	189.976	0.99455	344	39.8

Algoritmos híbridos con reinicio

Tabla 65 Resultados algoritmo híbrido con reinicio M-01 / R-01

Redes	Solución	P _{pérdidas} (kW)	P _{MS} /P	n _{RC}	T _{CPU} (s)
red10g	4-8-9-12	268.288	1	21	0.641
red14c	7-8-16	466.127	1	16	0.203
red16a	2-8-15-16-19-20	10340.7	0.99998	58	0.797
red33bw	7-9-14-32-37	139.551	1	26	0.359
red69cj	14-58-61-69-70	30.0928	1	39	0.75
red69d	13-30-45-51-66-70-75-76-77-78-79	201.412	1	85	1.66
red84sl	7-13-34-39-42-55-62-72-82-86-89-90-92	625.514	0.99887	173	3.83
red118z	23-26-34-39-42-51-58-71-74-95-97-109-122-129-130	869.726	1	118	3.36
red137p	14-58-61-69-70-87-131-134-142-143-147-148	60.1856	1	115	3.36
red205p	14-58-61-69-70-87-98-127-133-142-143-145-147-148-164-169-206-209-217-219	85.0925	1	468	21.2
red273	17-21-45-58-61-69-87-131-134-137-142-143-147-162-206-209-217-218-222-224-225-233-236-281-284-287-293	192.868	0.97964	492	34.1

Tabla 66 Resultados algoritmo híbrido con reinicio M-01 / R-02

Redes	Solución	P _{pérdidas} (kW)	P _{MS} /P	n _{RC}	T _{CPU} (s)
red10g	4-8-9-12	268.288	1	21	0.313
red14c	7-8-16	466.127	1	22	0.313
red16a	2-8-15-16-19-20	10340.7	0.99998	67	0.938
red33bw	7-9-14-32-37	139.551	1	31	0.406
red69cj	14-58-61-69-70	30.0928	1	47	1.06
red69d	13-30-45-51-66-70-75-76-77-78-79	201.412	1	89	1.98
red84sl	7-13-34-39-42-55-62-72-83-86-89-90-92	624.808	1	234	5.83
red118z	23-26-34-39-42-51-58-71-74-95-97-109-122-129-130	869.726	1	137	4.66
red137p	14-58-61-69-70-87-131-134-142-143-147-148	60.1856	1	136	4.95
red205p	14-58-61-69-70-87-98-127-133-142-143-145-147-148-164-169-206-209-217-219	85.0925	1	412	21.4
red273	17-21-45-58-61-69-87-131-134-137-142-143-147-162-206-209-217-218-222-224-225-233-236-281-284-287-293	192.868	0.97964	525	40.2

Tabla 67 Resultados algoritmo híbrido con reinicio M-02 / R-01

Redes	Solución	P _{pérdidas} (kW)	P _{MS} /P	n _{RC}	T _{CPU} (s)
red10g	4-8-9-12	268.288	1	24	0.297
red14c	7-8-16	466.127	1	18	0.188
red16a	2-8-15-16-19-20	10340.7	0.99998	64	0.844
red33bw	7-9-14-32-37	139.551	1	30	0.469
red69cj	14-58-61-69-70	30.0928	1	45	0.859
red69d	13-30-45-51-66-70-75-76-77-78-79	201.412	1	95	1.8
red84sl	7-13-34-39-42-55-62-72-82-86-89-90-92	625.514	0.99887	195	4.31
red118z	23-26-34-39-42-51-58-71-74-95-97-109-122-129-130	869.726	1	90	2.72
red137p	14-58-61-69-70-87-131-134-142-143-147-148	60.1856	1	138	4.25
red205p	14-58-61-69-70-87-98-127-133-142-143-145-147-148-164-169-206-209-217-219	85.0925	1	584	30.4
red273	17-21-45-58-61-69-87-131-134-137-142-143-147-162-206-209-217-218-222-224-225-233-236-281-284-287-293	192.868	0.97964	626	59.9

Tabla 68 Resultados algoritmo híbrido con reinicio M-02 / R-02

Redes	Solución	P _{pérdidas} (kW)	P _{MS} /P	n _{RC}	T _{CPU} (s)
red10g	4-8-9-12	268.288	1	24	0.281
red14c	7-8-16	466.127	1	24	0.328
red16a	2-8-15-16-19-20	10340.7	0.99998	73	0.953
red33bw	7-9-14-32-37	139.551	1	35	0.531
red69cj	14-58-61-69-70	30.0928	1	53	1.16
red69d	13-30-45-51-66-70-75-76-77-78-79	201.412	1	99	2.16
red84sl	7-13-34-39-42-55-62-72-83-86-89-90-92	624.808	1	258	6.41
red118z	23-26-34-39-42-51-58-71-74-95-97-109-122-129-130	869.726	1	101	3.47
red137p	14-58-61-69-70-87-131-134-142-143-147-148	60.1856	1	159	5.56
red205p	14-58-61-69-70-87-98-127-133-142-143-145-147-148-164-169-206-209-217-219	85.0925	1	618	34.6
red273	17-21-45-58-61-69-87-131-134-137-142-143-147-162-206-209-217-218-222-224-225-233-236-281-284-287-293	192.868	0.97964	663	66

Tabla 69 Resultados algoritmo híbrido con reinicio M-03 / R-01

Redes	Solución	P _{pérdidas} (kW)	P _{MS} /P	n _{RC}	T _{CPU} (s)
red10g	4-8-9-12	268.288	1	24	0.297
red14c	7-8-16	466.127	1	19	0.234
red16a	2-8-15-16-19-20	10340.7	0.99998	64	0.828
red33bw	7-9-14-32-37	139.551	1	33	0.469
red69cj	14-58-61-69-70	30.0928	1	45	0.922
red69d	13-30-45-51-66-70-75-76-77-78-79	201.412	1	95	1.89
red84sl	7-13-34-39-42-55-62-72-82-86-89-90-92	625.514	0.99887	196	4.38
red118z	23-26-34-39-42-51-58-71-74-95-97-109-122-129-130	869.726	1	91	2.7
red137p	14-58-61-69-70-87-131-134-142-143-147-148	60.1856	1	138	4.28
red205p	14-58-61-69-70-87-98-127-133-142-143-145-147-148-164-169-206-209-217-219	85.0925	1	593	31.6
red273	17-21-45-58-61-69-87-131-134-137-142-143-147-162-206-209-217-218-222-224-225-233-236-281-284-287-293	192.868	0.97964	626	60.8

Tabla 70 Resultados algoritmo híbrido con reinicio M-03 / R-02

Redes	Solución	P _{pérdidas} (kW)	P _{MS} /P	n _{RC}	T _{CPU} (s)
red10g	4-8-9-12	268.288	1	24	0.313
red14c	7-8-16	466.127	1	25	0.328
red16a	2-8-15-16-19-20	10340.7	0.99998	73	0.984
red33bw	7-9-14-32-37	139.551	1	38	0.563
red69cj	14-58-61-69-70	30.0928	1	53	1.25
red69d	13-30-45-51-66-70-75-76-77-78-79	201.412	1	99	2.2
red84sl	7-13-34-39-42-55-62-72-83-86-89-90-92	624.808	1	259	6.48
red118z	23-26-34-39-42-51-58-71-74-95-97-109-122-129-130	869.726	1	102	3.47
red137p	14-58-61-69-70-87-131-134-142-143-147-148	60.1856	1	159	5.59
red205p	14-58-61-69-70-87-98-127-133-142-143-145-147-148-164-169-206-209-217-219	85.0925	1	626	35.7
red273	17-21-45-58-61-69-87-131-134-137-142-143-147-162-206-209-217-218-222-224-225-233-236-281-284-287-293	192.868	0.97964	663	66

Tabla 71 Resultados algoritmo híbrido con reinicio M-04 / R-01

Redes	Solución	P _{pérdidas} (kW)	P _{MS} /P	n _{RC}	T _{CPU} (s)
red10g	4-8-9-12	268.288	1	25	0.359
red14c	7-8-16	466.127	1	22	0.734
red16a	2-8-15-16-19-20	10340.7	0.99998	86	1.08
red33bw	7-9-14-32-37	139.551	1	34	0.469
red69cj	14-58-61-69-70	30.0928	1	45	0.922
red69d	13-30-45-51-66-70-75-76-77-78-79	201.412	1	104	2.11
red84sl	7-13-34-39-42-55-62-72-83-86-89-90-92	624.808	1	206	4.72
red118z	23-26-34-39-42-51-58-71-74-95-97-109-122-129-130	869.726	1	98	3.13
red137p	14-58-61-69-70-87-131-134-142-143-147-148	60.1856	1	148	5.16
red205p	14-58-61-69-70-87-98-127-133-142-143-145-147-148-164-169-206-209-217-219	85.0925	1	625	31.8
red273	17-21-45-58-61-69-87-98-131-134-142-143-147-162-206-209-217-218-222-224-225-233-236-281-284-287-293	191.731	0.98545	626	65

Tabla 72 Resultados algoritmo híbrido con reinicio M-04 / R-02

Redes	Solución	P _{pérdidas} (kW)	P _{MS} /P	n _{RC}	T _{CPU} (s)
red10g	4-8-9-12	268.288	1	25	0.313
red14c	7-8-16	466.127	1	28	0.984
red16a	2-8-15-16-19-20	10340.7	0.99998	95	1.23
red33bw	7-9-14-32-37	139.551	1	39	0.641
red69cj	14-58-61-69-70	30.0928	1	53	1.23
red69d	13-30-45-51-66-70-75-76-77-78-79	201.412	1	108	2.39
red84sl	7-13-34-39-42-55-62-72-83-86-89-90-92	624.808	1	225	5.67
red118z	23-26-34-39-42-51-58-71-74-95-97-109-122-129-130	869.726	1	109	3.8
red137p	14-58-61-69-70-87-131-134-142-143-147-148	60.1856	1	169	6.56
red205p	14-58-61-69-70-87-98-127-133-142-143-145-147-148-164-169-206-209-217-219	85.0925	1	563	30.4
red273	17-21-45-58-61-69-87-98-131-134-142-143-147-162-206-209-217-218-222-224-225-233-236-281-284-287-293	191.731	0.98545	649	70.5

7.2.2 Tablas del índice de tiempos e índice de repartos de carga

A continuación se relacionan los valores de los índices utilizados en el apartado 6.2 .

Tabla 73 Índices de tiempo de CPU para los algoritmos mallados

Alg\Red	10g	14c	16a	33bw	69cj	69d	84sl	118z	137p	205p	273
M01	41.03	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
M01_iter	76.92	91.07	78.26	69.49	70.79	54.23	48.8	55.42	60.04	68.84	74.64
M02	100	98.21	95.65	94.92	93.26	96.15	96.17	95.66	95.03	96.21	96.45
M02_iter	69.23	89.29	62.32	52.54	57.3	32.69	23.21	24.34	35.36	33	33.47
M02_var_1	100	98.21	94.2	94.92	93.26	95.38	95.93	95.9	95.58	96.77	96.49
M02_var_2	97.44	98.21	97.1	94.92	94.38	94.62	95.69	95.9	94.66	96.32	96.43
M02_var_3	79.49	92.86	72.46	69.49	70.79	56.54	48.33	54.46	59.67	73.12	75.75
M02_var_4	79.49	92.86	73.91	66.1	71.91	56.92	48.09	54.82	60.59	73.57	75.5
M02_var_5	87.18	91.07	73.91	67.8	68.54	50	48.56	54.82	60.22	71.48	75.69
M03	87.18	96.43	97.1	88.14	92.13	95.77	96.17	95.66	95.03	96.18	96.34
M03_iter	64.1	76.79	60.87	40.68	43.82	27.31	18.9	19.04	27.81	28.59	30.78
M04	74.36	10.71	89.86	76.27	89.89	91.54	91.39	92.29	86.37	94.03	94.39
M04_iter	64.1	23.21	18.84	27.12	48.31	0	0	0	2.947	0	0

Tabla 74 Índices de tiempo de CPU para los algoritmos radiales

Alg\Red	10g	14c	16a	33bw	69cj	69d	84sl	118z	137p	205p	273
R01	41.03	67.86	73.91	76.27	64.04	75	72.01	70.36	65.01	80.97	82.27
R01_var_1	100	64.29	84.06	44.07	70.79	75.38	74.88	76.39	70.17	79.26	78.92
R01_var_2	89.74	58.93	75.36	67.8	58.43	70.38	68.66	67.71	60.77	79.33	81.23
R02	84.62	76.79	69.57	52.54	26.97	61.15	57.89	56.39	32.41	70.55	73.78
R02_var_1	97.44	80.36	78.26	0	31.46	62.31	60.53	61.2	32.04	61.97	66.66
R02_var_2	89.74	66.07	60.87	32.2	0	50	46.65	38.92	0	44.11	50.99
R01-R02	0	14.29	56.52	40.68	33.71	52.31	43.78	40.6	44.94	70.93	75.14

Tabla 75 Índices de tiempo de CPU para los algoritmos híbridos

Alg\Red	10g	14c	16a	33bw	69cj	69d	84sl	118z	137p	205p	273
M01-R01	23.08	89.29	69.57	77.97	69.66	68.46	64.11	82.77	82.5	83.61	83.92
M01-R02	66.67	71.43	59.42	66.1	48.31	60.38	50.24	71.69	69.06	79.54	78.78
M02-R01	74.36	87.5	68.12	74.58	62.92	73.85	61.24	85.42	77.35	80.62	80.33
M02-R02	64.1	82.14	52.17	59.32	42.7	65	47.13	79.52	66.11	68.15	75.56
M03-R01	74.36	83.93	68.12	66.1	61.8	71.92	61.24	84.58	77.9	80.44	79.98
M03-R02	76.92	76.79	53.62	54.24	39.33	65	47.61	79.28	64.46	68.08	75.15
M04-R01	56.41	10.71	53.62	57.63	62.92	68.46	56.22	81.69	66.67	79.12	78.57
M04-R02	69.23	23.21	44.93	49.15	40.45	60	42.58	76.27	51.38	74.23	73.47

Tabla 76 Índices de tiempo de CPU para los algoritmos híbridos con reinicio

Alg\Red	10g	14c	16a	33bw	69cj	69d	84sl	118z	137p	205p	273
M01-R01_r	17.95	89.29	40.58	77.97	59.55	69.23	50.24	80.24	67.03	55.64	77.53
M01-R02_r	71.79	76.79	27.54	72.88	37.08	61.15	19.62	70.24	48.25	55.12	73.2
M02-R01_r	74.36	91.07	36.23	66.1	51.69	65.77	42.82	85.18	56.54	35.22	59.18
M02-R02_r	76.92	75	26.09	59.32	30.34	56.92	10.77	79.4	41.07	25.77	54.81
M03-R01_r	74.36	85.71	37.68	66.1	47.19	63.46	41.87	85.3	56.17	32.58	58.53
M03-R02_r	71.79	75	23.19	55.93	23.6	55.77	9.569	79.4	40.7	23.52	54.82
M04-R01_r	64.1	28.57	14.49	66.1	47.19	58.08	36.6	82.05	45.86	31.99	55.52
M04-R02_r	71.79	0	0	47.46	24.72	51.15	22.01	76.87	29.28	35.19	51.67

Tabla 77 Índices de número de repartos de carga para los algoritmos mallados

Alg\Red	10g	14c	16a	33bw	69cj	69d	84sl	118z	137p	205p	273
M01	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
M01_iter	31.82	66.67	71.08	62.5	54.72	48.26	38.46	43.29	46.09	55.84	49.02
M02	86.36	91.67	95.18	93.75	92.45	95.52	95.6	96.46	95.65	97.66	98.19
M02_iter	4.545	54.17	59.04	46.88	35.85	25.87	9.89	16.71	21.74	33.21	29.74
M02_var_1	86.36	91.67	95.18	93.75	92.45	94.53	95.6	96.46	95.65	97.66	98.19
M02_var_2	86.36	91.67	95.18	93.75	92.45	94.53	95.6	96.46	95.65	97.91	98.19
M02_var_3	31.82	66.67	67.47	62.5	54.72	48.26	38.46	43.29	43.48	57.32	47.67
M02_var_4	31.82	66.67	67.47	62.5	54.72	47.76	38.46	43.29	43.48	59.29	50.15
M02_var_5	31.82	66.67	67.47	62.5	54.72	42.29	38.46	43.29	43.48	54.49	47.36
M03	86.36	87.5	95.18	89.06	92.45	95.52	95.6	96.2	95.65	97.54	98.19
M03_iter	4.545	29.17	55.42	39.06	28.3	24.88	8.791	13.92	18.26	30.5	27.48
M04	81.82	75	86.75	87.5	92.45	93.03	93.77	94.43	94.35	96.06	97.14
M04_iter	0	70.83	14.46	31.25	28.3	0	0	0	0	0	0

Tabla 78 Índices de número de repartos de carga para los algoritmos radiales

Alg\Red	10g	14c	16a	33bw	69cj	69d	84sl	118z	137p	205p	273
R01	86.36	66.67	74.7	75	47.17	73.63	67.03	69.11	68.7	83.03	83.89
R01_var_1	86.36	66.67	81.93	32.81	52.83	75.12	69.23	74.43	72.61	79.7	80.5
R01_var_2	68.18	54.17	69.88	67.19	37.74	68.16	62.27	65.32	63.48	80.57	82
R02	86.36	37.5	69.88	57.81	22.64	69.65	61.17	63.04	57.39	78.6	80.65
R02_var_1	86.36	37.5	80.72	0	30.19	70.65	63.74	67.09	62.17	65.93	69.43
R02_var_2	68.18	0	61.45	40.63	0	62.69	54.58	56.46	46.09	74.42	77.79
R01-R02	31.82	4.167	51.81	43.75	11.32	55.22	40.29	38.23	49.57	74.42	77.33

Tabla 79 Índices de número de repartos de carga para los algoritmos híbridos

Alg\Red	10g	14c	16a	33bw	69cj	69d	84sl	118z	137p	205p	273
M01-R01	45.45	62.5	67.47	76.56	60.38	68.66	59.34	80.25	79.13	84.13	82.83
M01-R02	45.45	37.5	59.04	68.75	45.28	66.67	52.75	75.44	72.17	82.9	81.17
M02-R01	31.82	54.17	62.65	70.31	52.83	71.64	54.95	85.06	74.78	81.43	81.02
M02-R02	31.82	29.17	54.22	62.5	37.74	69.65	48.35	82.28	67.83	73.55	79.14
M03-R01	31.82	50	62.65	65.63	52.83	71.64	54.95	84.81	74.78	81.3	81.02
M03-R02	31.82	25	54.22	57.81	37.74	69.65	48.35	82.03	67.83	73.43	79.14
M04-R01	27.27	37.5	54.22	64.06	52.83	69.15	53.11	83.04	73.48	80.2	79.97
M04-R02	27.27	12.5	45.78	56.25	37.74	67.16	46.52	80.25	66.52	78.97	78.09

Tabla 80 Índices de número de repartos de carga para los algoritmos híbridos con reinicio

Alg\Red	10g	14c	16a	33bw	69cj	69d	84sl	118z	137p	205p	273
M01-R01 r	45.45	62.5	44.58	76.56	47.17	68.66	46.52	77.97	60.43	47.23	66.94
M01-R02 r	45.45	37.5	33.73	68.75	32.08	66.67	24.18	73.16	51.3	54.12	64.46
M02-R01_r	31.82	54.17	37.35	70.31	35.85	63.68	38.46	85.06	50.43	32.96	56.85
M02-R02_r	31.82	29.17	26.51	62.5	20.75	61.69	15.38	82.28	41.3	28.78	54.07
M03-R01_r	31.82	50	37.35	65.63	35.85	63.68	38.1	84.81	50.43	31.86	56.85
M03-R02_r	31.82	25	26.51	57.81	20.75	61.69	15.02	82.03	41.3	27.8	54.07
M04-R01_r	27.27	37.5	10.84	64.06	35.85	59.2	34.43	83.04	46.09	27.92	56.85
M04-R02 r	27.27	12.5	0	56.25	20.75	57.21	27.47	80.25	36.96	35.55	55.12

Tabla 81 Ordenación de los algoritmos en cuanto a tiempo de ejecución/repartos de carga

I_T	Algoritmo	I_{RC}	Algoritmo	I_T	Algoritmo	I_{RC}	Algoritmo
100.00	M01	100.00	M01	63.78	M02-R02	57.00	M03-R02
95.82	M02-var2	94.41	M02	62.35	M03-R02	54.28	M04-R02
95.77	M02	94.34	M02-var-2	61.56	M04-R01	51.61	M01-iter
95.66	M02-var1	94.32	M02-var-1	58.98	M02-R01-r	51.42	M02-var-4
94.90	M03	93.57	M03	57.80	R02	51.06	M02-var-3
81.67	M04	90.21	M04	57.46	M03-R01-r	50.63	M02-R01-r
77.19	M01-R01	72.30	R01	54.19	M01-R02-r	50.23	M02-var-5
75.19	M02-R01	70.20	R01-var-1	53.57	M04-R02	50.13	M01-R02-r
73.60	M03-R01	69.70	M01-R01	53.48	R02-var1	49.67	M03-R01-r
72.77	R01	65.51	M02-R01	47.29	R01-R02	49.30	R02-var-2
71.82	R01-var1	65.36	R01-var-2	46.65	M04-R01-r	43.91	M04-R01-r
68.86	R01-var2	64.68	M03-R01	45.95	M02-R02-r	43.45	R01-R02
67.43	M02-var4	62.47	M01-R02	44.35	M02-iter	41.30	M02-R02-r
67.35	M02-var3	62.25	R02	44.15	M03-R02-r	40.35	M03-R02-r
67.16	M01-iter	61.35	M04-R01	38.98	R02-var2	37.21	M04-R02-r
66.73	M01-R01-r	58.55	M01-R01-r	37.46	M03-iter	30.69	M02-iter
66.21	M02-var5	57.84	M02-R02	33.83	M04-R02-r	25.49	M03-iter
65.50	M01-R02	57.62	R02-var-1	12.04	M04-iter	13.17	M04-iter

7.2.3 Resultados de los diferentes métodos de reparto de cargas

En este apartado se incluyen dos tablas con los resultados de aplicar los métodos de reparto de cargas del Capítulo 5 a las diferentes redes de test.

En concreto en la Tabla 82 se presentan las pérdidas obtenidas mediante los diferentes métodos para las redes de test. La configuración utilizada para las redes ha sido la configuración mallada, es decir, sin abrir ninguna de las ramas.

En la Tabla 83 se presentan los módulos de las tensiones de los nudos de una de las redes de test, en particular, la red de 33 nudos de Baran y Wu [5]. Para el resto del conjunto de redes se tienen resultados análogos.

Tabla 82 Pérdidas (MW) para las redes de test frente a los métodos de repartos de carga

Redes	Newton-Raphson (Método 0)	Desajuste de potencias (Método 1)	Desajuste de corrientes (Método 2)	Aprox. desajuste de corrientes (Método 3)
red10g	0.247001	0.229488	0.246377	0.246074
red14c	0.426258	0.410720	0.426167	0.423603
red16a	7.842924	7.448231	7.841767	7.878058
red33bw	0.123290	0.114358	0.122925	0.122793
red69cj	0.026041	0.024486	0.025988	0.025993
red69d	0.198424	0.178732	0.197318	0.197281
red84sl	0.614157	0.563442	0.612513	0.610771
red118z	0.819358	0.753090	0.816199	0.815905
red137p	0.049137	0.046443	0.049052	0.049062
red205p	0.066394	0.063046	0.066294	0.066306
red273	0.142634	0.131622	0.142125	0.142159

Tabla 83 Tensiones (módulo) para la red de test de 33 nudos "red33bw"

Nudo	Newton-Raphson (Método 0)	Desajuste de potencias (Método 1)	Desajuste de corrientes (Método 2)	Aprox. desajuste de corrientes (Método 3)
1	1.000000	1.000000	1.000000	1.000000
2	0.997091	0.997188	0.997095	0.997096
3	0.986237	0.986712	0.986256	0.986260
4	0.982550	0.983152	0.982573	0.982580
5	0.979100	0.979828	0.979128	0.979136
6	0.971049	0.972084	0.971090	0.971109
7	0.970077	0.971149	0.970118	0.970150
8	0.968956	0.970070	0.969000	0.969030
9	0.965662	0.966914	0.965712	0.965748
10	0.965234	0.966503	0.965284	0.965323
11	0.965233	0.966503	0.965283	0.965322
12	0.965365	0.966631	0.965415	0.965454
13	0.961965	0.963377	0.962022	0.962064
14	0.960760	0.962224	0.960819	0.960863
15	0.960405	0.961889	0.960465	0.960510
16	0.958597	0.960165	0.958661	0.958708
17	0.955066	0.956798	0.955138	0.955184
18	0.953958	0.955743	0.954033	0.954078
19	0.995331	0.995486	0.995337	0.995340
20	0.980742	0.981411	0.980767	0.980785
21	0.976656	0.977476	0.976688	0.976711
22	0.972927	0.973890	0.972964	0.972995
23	0.980735	0.981411	0.980761	0.980769
24	0.970002	0.971085	0.970045	0.970060
25	0.962649	0.964036	0.962705	0.962726
26	0.970050	0.971125	0.970093	0.970112
27	0.968785	0.969912	0.968829	0.968850
28	0.963628	0.964976	0.963683	0.963706
29	0.960136	0.961635	0.960197	0.960223
30	0.956945	0.958587	0.957012	0.957041
31	0.953826	0.955615	0.953901	0.953938
32	0.953279	0.955095	0.953355	0.953396
33	0.953498	0.955304	0.953573	0.953617

7.2.4 Tablas de resultados ante diferentes métodos de reparto de cargas

La información que recoge cada tabla para cada método de resolución de los repartos de carga son: el índice P_{MS}/P , el número de repartos de carga n_{RC} y el tiempo de CPU (t_{CPU}). Se ha resaltado en sombreado gris los resultados que difieren respecto al método utilizado como referencia (Newton-Raphson).

Algoritmos mallados

Tabla 84 Comparativa métodos reparto de carga. Algoritmo mallado M-01

Redes	Newton-Raphson			Linealización desajuste de potencia			Linealización desajuste de corrientes			Aprox.linealización desajuste de corrientes		
	P_{MS}/P	n_{RC}	t_{CPU}	P_{MS}/P	n_{RC}	t_{CPU}	P_{MS}/P	n_{RC}	t_{CPU}	P_{MS}/P	n_{RC}	t_{CPU}
red10g	1	9	0.5	1	9	0.188	1	9	0.188	1	9	0.234
red14c	1	7	0.109	1	7	0.0156	1	7	0.0313	1	7	0.0469
red16a	0.994841	12	0.156	0.994841	12	0.0469	0.994841	12	0.0313	0.994841	12	0.0625
red33bw	1	11	0.156	1	11	0.0313	1	11	0.0156	1	11	0.0313
red69cj	0.998114	11	0.188	0.998114	11	0.0313	0.998114	11	0.0625	0.998114	11	0.0625
red69d	0.986773	22	0.406	0.986773	22	0.0938	0.986773	22	0.109	0.986773	22	0.0781
red84sl	0.99659	27	0.578	0.99659	27	0.125	0.99659	27	0.156	0.99659	27	0.141
red118z	0.994407	31	0.797	0.994407	31	0.172	0.994407	31	0.234	0.994407	31	0.172
red137p	0.998114	24	0.563	0.998114	24	0.156	0.998114	24	0.203	0.998114	24	0.156
red205p	0.989605	39	1.25	0.989605	39	0.313	0.989605	39	0.469	0.989605	39	0.328
red273	0.957772	53	2.52	0.957856	54	0.609	0.957772	54	0.953	0.957772	54	0.656

Tabla 85 Comparativa métodos reparto de carga. Algoritmo mallado M-01 iterativo

Redes	Newton-Raphson			Linealización desajuste de potencia			Linealización desajuste de corrientes			Aprox.linealización desajuste de corrientes		
	P_{MS}/P	n_{RC}	t_{CPU}	P_{MS}/P	n_{RC}	t_{CPU}	P_{MS}/P	n_{RC}	t_{CPU}	P_{MS}/P	n_{RC}	t_{CPU}
red10g	1	24	0.281	1	24	0.0938	1	24	0.0938	1	24	0.0938
red14c	1	15	0.188	1	15	0.0469	1	15	0.0625	1	15	0.0469
red16a	0.999982	36	0.391	0.999982	36	0.0469	0.999982	36	0.0938	0.999982	36	0.0781
red33bw	1	35	0.438	1	35	0.109	1	35	0.109	1	35	0.109
red69cj	1	35	0.594	1	35	0.125	1	35	0.156	1	35	0.141
red69d	1	126	2.27	0.999849	126	0.422	1	126	0.563	1	126	0.438
red84sl	0.998871	195	3.92	0.998871	195	0.672	0.998871	195	0.984	0.998871	195	0.703
red118z	1	255	6.58	1	255	1.28	1	255	1.94	1	255	1.28
red137p	1	148	3.95	1	148	0.828	1	148	1.17	1	148	0.828
red205p	0.998414	398	15.3	0.998414	398	3.42	0.998414	398	5.28	0.998414	398	3.28
red273	0.991423	730	38.2	0.991423	731	9.8	0.991423	731	15.5	0.991423	731	9.75

Tabla 86 Comparativa métodos reparto de carga. Algoritmo mallado M-02

Redes	Newton-Raphson			Linealización desajuste de potencia			Linealización desajuste de corrientes			Aprox.linealización desajuste de corrientes		
	P _{MS} /P	n _{RC}	t _{CPU}	P _{MS} /P	n _{RC}	t _{CPU}	P _{MS} /P	n _{RC}	t _{CPU}	P _{MS} /P	n _{RC}	t _{CPU}
red10g	1	12	0.141	1	12	0.0469	1	12	0.0313	1	12	0.0625
red14c	1	9	0.125	1	9	0.0313	1	9	0.0156	1	9	0.0313
red16a	0.994841	16	0.203	0.994841	16	0.0313	0.994841	16	0.0625	0.994841	16	0.0313
red33bw	1	15	0.203	1	15	0.0313	1	15	0.0625	1	15	0.0625
red69cj	0.998114	15	0.281	0.998114	15	0.0781	0.998114	15	0.0781	0.998114	15	0.0781
red69d	0.999849	31	0.563	0.999849	31	0.141	0.999849	31	0.156	0.999849	31	0.125
red84sl	0.99659	39	0.828	0.99659	39	0.172	0.99659	39	0.219	0.99659	39	0.188
red118z	1	45	1.36	1	45	0.422	1	45	0.5	1	45	0.344
red137p	0.998114	34	0.984	0.998114	34	0.313	0.998114	34	0.359	0.998114	34	0.266
red205p	0.970511	58	2.95	0.970511	58	1.23	0.970511	58	1.56	0.970511	58	1
red273	0.958356	77	7.5	0.958356	77	4.05	0.958356	77	4.63	0.958356	77	3.86

Tabla 87 Comparativa métodos reparto de carga. Algoritmo mallado M-02 iterativo

Redes	Newton-Raphson			Linealización desajuste de potencia			Linealización desajuste de corrientes			Aprox.linealización desajuste de corrientes		
	P _{MS} /P	n _{RC}	t _{CPU}	P _{MS} /P	n _{RC}	t _{CPU}	P _{MS} /P	n _{RC}	t _{CPU}	P _{MS} /P	n _{RC}	t _{CPU}
red10g	1	30	0.328	1	30	0.0781	1	30	0.0781	1	30	0.0781
red14c	1	18	0.203	1	18	0.0313	1	18	0.0469	1	18	0.0313
red16a	0.999982	46	0.563	0.998003	46	0.109	0.998003	46	0.125	0.998003	46	0.109
red33bw	1	45	0.594	1	45	0.125	1	45	0.156	1	45	0.125
red69cj	1	45	0.781	1	45	0.172	1	45	0.188	1	45	0.172
red69d	1	171	3.14	0.999849	171	0.625	1	171	0.766	1	171	0.625
red84sl	0.998871	273	5.59	0.998871	273	1.08	0.998871	273	1.41	0.998871	273	1.06
red118z	1	360	10.6	1	360	3.22	1	360	3.86	1	360	2.61
red137p	1	204	6.05	1	205	1.63	1	204	2	1	204	1.53
red205p	1	582	31.4	1	582	12	1	582	15.3	1	582	10
red273	0.999915	986	96	0.998137	982	49.9	0.998701	984	56	0.998701	984	48.6

Tabla 88 Comparativa métodos reparto de carga. Algoritmo mallado M-02 variante 1

Redes	Newton-Raphson			Linealización desajuste de potencia			Linealización desajuste de corrientes			Aprox.linealización desajuste de corrientes		
	P _{MS} /P	n _{RC}	t _{CPU}	P _{MS} /P	n _{RC}	t _{CPU}	P _{MS} /P	n _{RC}	t _{CPU}	P _{MS} /P	n _{RC}	t _{CPU}
red10g	1	12	0.141	1	12	0.0469	1	12	0.0313	1	12	0.0156
red14c	1	9	0.125	1	9	0.0156	1	9	0.0156	1	9	0.0469
red16a	0.994841	16	0.219	0.994841	16	0.0313	0.994841	16	0.0625	0.994841	16	0.0313
red33bw	1	15	0.203	1	15	0.0469	1	15	0.0469	1	15	0.0313
red69cj	0.998114	15	0.281	0.998114	15	0.0781	0.998114	15	0.0781	0.998114	15	0.0938
red69d	0.999849	33	0.594	0.999849	31	0.125	0.999849	31	0.156	0.999849	31	0.141
red84sl	0.99831	39	0.844	0.99831	39	0.203	0.99831	39	0.219	0.99831	39	0.172
red118z	1	45	1.33	1	45	0.422	1	45	0.516	1	45	0.344
red137p	0.998114	34	0.938	0.998114	34	0.313	0.998114	34	0.359	0.998114	34	0.266
red205p	0.989605	58	2.7	0.96877	56	1.22	0.989605	58	1.58	0.989605	58	1
red273	0.958356	77	7.45	0.958356	77	3.98	0.958356	77	4.7	0.958356	77	3.63

Tabla 89 Comparativa métodos reparto de carga. Algoritmo mallado M-02 variante 2

Redes	Newton-Raphson			Linealización desajuste de potencia			Linealización desajuste de corrientes			Aprox.linealización desajuste de corrientes		
	P _{MS} /P	n _{RC}	t _{CPU}	P _{MS} /P	n _{RC}	t _{CPU}	P _{MS} /P	n _{RC}	t _{CPU}	P _{MS} /P	n _{RC}	t _{CPU}
red10g	1	12	0.156	1	12	0.0625	1	12	0.0469	1	12	0.0469
red14c	1	9	0.125	1	9	0.0156	1	9	0.0156	1	9	0.0313
red16a	0.994841	16	0.188	0.994841	16	0.0313	0.994841	16	0.0313	0.994841	16	0.0313
red33bw	1	15	0.203	1	15	0.0469	1	15	0.0781	1	15	0.0313
red69cj	0.998114	15	0.266	0.998114	15	0.0313	0.998114	15	0.0781	0.998114	15	0.0938
red69d	0.985731	33	0.625	0.999849	31	0.172	0.999849	31	0.172	0.999849	31	0.141
red84sl	0.997149	39	0.859	0.997149	39	0.172	0.997149	39	0.219	0.997149	39	0.172
red118z	1	45	1.33	1	45	0.422	1	45	0.5	1	45	0.344
red137p	0.993106	34	1.02	0.993106	34	0.281	0.993106	34	0.344	0.993106	34	0.266
red205p	0.9714	56	2.91	0.96877	56	1.19	0.9714	56	1.47	0.9714	56	0.969
red273	0.990243	77	7.53	0.993263	77	4.06	0.623325	73	4.45	0.623325	73	3.52

Tabla 90 Comparativa métodos reparto de carga. Algoritmo mallado M-02 variante 3

Redes	Newton-Raphson			Linealización desajuste de potencia			Linealización desajuste de corrientes			Aprox.linealización desajuste de corrientes		
	P _{MS} /P	n _{RC}	t _{CPU}	P _{MS} /P	n _{RC}	t _{CPU}	P _{MS} /P	n _{RC}	t _{CPU}	P _{MS} /P	n _{RC}	t _{CPU}
red10g	0.961353	24	0.266	0.961353	24	0.0625	0.961353	24	0.0469	0.961353	24	0.0781
red14c	0.661148	15	0.172	0.661148	15	0.0313	0.661148	15	0.0469	0.661148	15	0.0313
red16a	0.993264	39	0.453	0.993264	39	0.0781	0.993264	39	0.0938	0.993264	39	0.0938
red33bw	1	35	0.438	1	35	0.0781	1	35	0.109	1	35	0.0938
red69cj	0.679416	35	0.594	0.679416	35	0.109	0.679416	35	0.156	0.679416	35	0.125
red69d	0.983281	126	2.17	0.983281	126	0.406	0.983281	126	0.578	0.983281	126	0.453
red84sl	0.917699	195	3.95	0.917699	195	0.672	0.917699	195	0.984	0.917699	195	0.719
red118z	0.975162	255	6.7	0.975162	255	1.31	0.975162	255	1.92	0.975162	255	1.3
red137p	0.786364	154	3.98	0.786364	154	0.844	0.786364	154	1.23	0.786364	154	0.875
red205p	0.990362	386	13.3	0.990362	386	3.38	0.990362	386	5.02	0.990362	386	3.34
red273	0.664551	748	36.6	0.664551	750	10.2	0.664551	751	16	0.664551	750	9.84

Tabla 91 Comparativa métodos reparto de carga. Algoritmo mallado M-02 variante 4

Redes	Newton-Raphson			Linealización desajuste de potencia			Linealización desajuste de corrientes			Aprox.linealización desajuste de corrientes		
	P _{MS} /P	n _{RC}	t _{CPU}	P _{MS} /P	n _{RC}	t _{CPU}	P _{MS} /P	n _{RC}	t _{CPU}	P _{MS} /P	n _{RC}	t _{CPU}
red10g	0.709336	24	0.266	0.709336	24	0.0625	0.709336	24	0.0625	0.709336	24	0.0625
red14c	0.661148	15	0.172	0.661148	15	0.0156	0.661148	15	0.0313	0.661148	15	0.0313
red16a	0.994841	39	0.438	0.994841	39	0.0938	0.994841	39	0.0938	0.994841	32	0.0781
red33bw	0.981613	35	0.469	0.981613	35	0.0938	0.981613	35	0.109	0.981613	35	0.109
red69cj	0.654217	35	0.578	0.654217	35	0.125	0.654217	35	0.172	0.654217	35	0.141
red69d	0.986773	127	2.16	0.986773	126	0.406	0.986773	127	0.547	0.986773	127	0.438
red84sl	0.823074	195	3.97	0.887445	195	0.672	0.823074	195	0.984	0.886027	195	0.719
red118z	0.990342	255	6.66	0.990342	255	1.33	0.990342	255	1.91	0.990342	255	1.31
red137p	0.786364	154	3.91	0.786364	154	0.859	0.786364	154	1.23	0.786364	154	0.875
red205p	0.85957	370	13.1	0.85957	370	3.23	0.85957	370	4.89	0.85957	370	3.23
red273	0.605723	715	37	0.605299	714	9.58	0.605723	715	15.4	0.605723	715	9.28

Tabla 92 Comparativa métodos reparto de carga. Algoritmo mallado M-02 variante 5

Redes	Newton-Raphson			Linealización desajuste de potencia			Linealización desajuste de corrientes			Aprox.linealización desajuste de corrientes		
	P _{MS} /P	n _{RC}	t _{CPU}	P _{MS} /P	n _{RC}	t _{CPU}	P _{MS} /P	n _{RC}	t _{CPU}	P _{MS} /P	n _{RC}	t _{CPU}
red10g	0.709336	24	0.219	0.709336	24	0.0625	0.709336	24	0.0781	0.709336	24	0.0938
red14c	0.661148	15	0.188	0.661148	15	0.0313	0.661148	15	0.0469	0.661148	15	0.0469
red16a	0.994841	39	0.438	0.994841	39	0.0781	0.994841	39	0.0938	0.994841	39	0.0938
red33bw	0.994813	35	0.453	0.994813	35	0.0938	0.994813	35	0.0938	0.994813	35	0.109
red69cj	0.654217	35	0.625	0.654217	35	0.125	0.654217	35	0.203	0.654217	35	0.141
red69d	0.979701	138	2.44	0.979701	129	0.391	0.979701	129	0.594	0.979701	129	0.453
red84sl	0.880894	195	3.94	0.880894	195	0.656	0.880894	195	1	0.880894	195	0.703
red118z	0.85538	255	6.66	0.957329	255	1.31	0.85538	255	1.91	0.85538	255	1.3
red137p	0.804287	154	3.94	0.804287	154	0.844	0.804287	154	1.25	0.804287	154	0.875
red205p	0.82794	409	14.1	0.82794	409	3.53	0.846705	406	5.36	0.846705	406	3.48
red273	0.63155	752	36.7	0.631711	753	9.98	0.631711	753	16.1	0.631711	753	9.7

Tabla 93 Comparativa métodos reparto de carga. Algoritmo mallado M-03

Redes	Newton-Raphson			Linealización desajuste de potencia			Linealización desajuste de corrientes			Aprox.linealización desajuste de corrientes		
	P _{MS} /P	n _{RC}	t _{CPU}	P _{MS} /P	n _{RC}	t _{CPU}	P _{MS} /P	n _{RC}	t _{CPU}	P _{MS} /P	n _{RC}	t _{CPU}
red10g	1	12	0.219	1	12	0.109	1	12	0.125	1	12	0.141
red14c	1	10	0.141	1	12	0.0625	1	12	0.0938	1	12	0.0781
red16a	0.994841	16	0.188	0.994841	16	0.0469	0.994841	16	0.0469	0.994841	16	0.0313
red33bw	1	18	0.266	1	19	0.0781	1	19	0.0938	1	19	0.0938
red69cj	0.998114	15	0.297	0.998114	15	0.0938	0.998114	15	0.109	0.998114	15	0.0938
red69d	0.999849	31	0.578	0.999849	31	0.141	0.999849	31	0.172	0.999849	31	0.156
red84sl	0.99659	39	0.828	0.99659	39	0.172	0.99659	39	0.234	0.99659	39	0.188
red118z	1	46	1.36	1	46	0.422	1	46	0.578	1	46	0.375
red137p	0.998114	34	0.984	0.998114	34	0.328	0.998114	34	0.406	0.998114	34	0.328
red205p	0.970511	59	2.97	0.970511	59	1.23	0.970511	59	1.63	0.970511	59	1.13
red273	0.958356	77	7.66	0.958356	77	4.09	0.958356	77	5.25	0.958356	77	3.84

Tabla 94 Comparativa métodos reparto de carga. Algoritmo mallado M-03 iterativo

Redes	Newton-Raphson			Linealización desajuste de potencia			Linealización desajuste de corrientes			Aprox.linealización desajuste de corrientes		
	P _{MS} /P	n _{RC}	t _{CPU}	P _{MS} /P	n _{RC}	t _{CPU}	P _{MS} /P	n _{RC}	t _{CPU}	P _{MS} /P	n _{RC}	t _{CPU}
red10g	1	30	0.359	1	30	0.109	1	30	0.109	1	30	0.125
red14c	1	24	0.313	1	26	0.078	1	26	0.078	1	26	0.078
red16a	0.999982	49	0.578	0.999982	49	0.125	0.999982	49	0.141	0.999982	49	0.141
red33bw	1	50	0.703	1	51	0.188	1	51	0.219	1	51	0.203
red69cj	1	49	0.969	1	49	0.297	1	49	0.359	1	49	0.344
red69d	1	173	3.36	0.999849	173	0.781	1	173	0.922	1	173	0.828
red84sl	1	276	5.88	1	276	1.28	1	276	1.61	1	276	1.36
red118z	1	371	11.3	1	371	3.73	1	371	4.8	1	371	3.2
red137p	1	212	6.69	1	213	2.02	1	212	2.39	1	212	2.03
red205p	1	604	33.4	1	604	13.3	1	604	16.3	1	604	11.4
red273	1	1016	99.8	0.998302	1012	54.6	0.998866	1015	66.1	0.998866	1015	50.4

Tabla 95 Comparativa métodos reparto de carga. Algoritmo mallado M-04

Redes	Newton-Raphson			Linealización desajuste de potencia			Linealización desajuste de corrientes			Aprox.linealización desajuste de corrientes		
	P _{MS} /P	n _{RC}	t _{CPU}	P _{MS} /P	n _{RC}	t _{CPU}	P _{MS} /P	n _{RC}	t _{CPU}	P _{MS} /P	n _{RC}	t _{CPU}
red10g	1	13	0.297	1	13	0.219	1	13	0.203	1	13	0.328
red14c	1	13	0.891	1	13	0.594	1	13	0.75	1	13	0.828
red16a	0.994841	23	0.266	0.994841	24	0.109	0.994841	24	0.125	0.994841	24	0.172
red33bw	1	19	0.375	1	20	0.109	1	20	0.125	1	20	0.109
red69cj	0.998114	15	0.328	0.998114	15	0.109	0.998114	15	0.125	0.998114	15	0.109
red69d	0.999849	36	0.75	0.999849	36	0.297	0.999849	36	0.313	0.999849	36	0.281
red84sl	0.997713	44	1.14	0.997713	43	0.391	0.997713	43	0.438	0.997713	43	0.391
red118z	1	53	1.8	1	53	0.719	1	53	0.859	1	53	0.688
red137p	0.998114	37	1.72	0.998114	37	0.922	0.998114	37	0.969	0.998114	37	0.891
red205p	0.989605	71	3.94	0.989605	71	2.03	0.989605	71	2.11	0.989605	71	1.86
red273	0.958356	91	10.4	0.958356	91	6.69	0.958356	91	6.36	0.958356	91	5.55

Tabla 96 Comparativa métodos reparto de carga. Algoritmo mallado M-04 iterativo

Redes	Newton-Raphson			Linealización desajuste de potencia			Linealización desajuste de corrientes			Aprox.linealización desajuste de corrientes		
	P _{MS} /P	n _{RC}	t _{CPU}	P _{MS} /P	n _{RC}	t _{CPU}	P _{MS} /P	n _{RC}	t _{CPU}	P _{MS} /P	n _{RC}	t _{CPU}
red10g	1	31	0.359	1	31	0.109	1	31	0.125	1	31	0.109
red14c	1	14	0.781	1	14	0.359	1	14	0.516	1	14	0.578
red16a	0.999982	83	1.03	0.999982	84	0.266	0.999982	84	0.281	0.999982	84	0.281
red33bw	1	55	0.828	1	56	0.234	1	56	0.281	1	56	0.266
red69cj	1	49	0.906	1	49	0.25	1	49	0.281	1	49	0.234
red69d	1	223	4.47	0.999849	223	1.3	1	223	1.47	1	223	1.33
red84sl	1	300	7.11	1	293	2	1	293	2.25	1	293	2.02
red118z	1	426	13.8	1	428	4.86	1	428	5.17	1	428	4.52
red137p	1	254	8.8	1	254	3.09	1	254	3.69	1	254	3.05
red205p	1	852	46.2	0.979944	730	17.9	1	851	22	1	851	16.8
red273	0.997753	1381	143	0.991777	1385	80.6	0.998645	1379	95.5	0.998645	1379	70.1

Algoritmos radiales

Tabla 97 Comparativa métodos reparto de carga. Algoritmo radial R-01

Redes	Newton-Raphson			Linealización desajuste de potencia			Linealización desajuste de corrientes			Aprox.linealización desajuste de corrientes		
	P _{MS} /P	n _{RC}	t _{CPU}	P _{MS} /P	n _{RC}	t _{CPU}	P _{MS} /P	n _{RC}	t _{CPU}	P _{MS} /P	n _{RC}	t _{CPU}
red10g	0.968103	12	0.5	0.968103	12	0.203	0.968103	12	0.188	0.968103	12	0.203
red14c	1	15	0.391	1	15	0.328	1	15	0.219	1	15	0.203
red16a	1	33	0.438	1	33	0.0625	1	33	0.0938	1	33	0.0781
red33bw	1	27	0.375	1	27	0.0781	1	27	0.0781	1	27	0.0781
red69cj	1	39	0.688	1	39	0.156	1	39	0.172	1	39	0.156
red69d	0.987989	75	1.42	0.999849	51	0.188	0.987989	75	0.297	0.987989	75	0.25
red84sl	0.998871	117	2.41	0.99831	108	0.406	0.998871	117	0.531	0.998871	117	0.438
red118z	0.992162	153	4.64	0.978731	135	1.2	0.992162	153	1.39	0.992162	153	1.27
red137p	1	96	3.53	1	96	1.11	1	96	1.39	1	96	1.23
red205p	0.970071	177	9.81	0.970065	165	3.34	0.970065	165	4.02	0.970065	165	3.7
red273	0.99455	267	27.4	0.993835	267	12.6	0.99455	267	17.7	0.99455	267	16.5

Tabla 98 Comparativa métodos reparto de carga. Algoritmo radial R-01 variante 1

Redes	Newton-Raphson			Linealización desajuste de potencia			Linealización desajuste de corrientes			Aprox.linealización desajuste de corrientes		
	P _{MS} /P	n _{RC}	t _{CPU}	P _{MS} /P	n _{RC}	t _{CPU}	P _{MS} /P	n _{RC}	t _{CPU}	P _{MS} /P	n _{RC}	t _{CPU}
red10g	0.968103	12	0.141	0.968103	12	0.0313	0.968103	12	0.0469	0.968103	12	0.0313
red14c	1	15	0.422	1	15	0.203	1	15	0.219	1	15	0.203
red16a	1	27	0.328	1	27	0.0625	1	27	0.0469	1	27	0.0469
red33bw	1	54	0.672	1	36	0.0938	1	54	0.172	1	54	0.156
red69cj	1	36	0.594	1	36	0.141	1	36	0.141	1	36	0.125
red69d	0.983527	72	1.41	0.999849	90	0.313	0.983527	72	0.344	0.983527	72	0.266
red84sl	0.998871	111	2.22	0.99831	78	0.281	0.998871	111	0.5	0.998871	111	0.406
red118z	0.979879	132	3.86	0.978644	132	1.16	0.979879	132	1.45	0.979879	132	1.08
red137p	1	87	3.09	1	87	1.02	1	87	4.33	1	87	3.59
red205p	0.989252	204	10.6	0.989491	168	3.84	1	240	4.41	1	240	5.41
red273	0.999986	312	32.2	0.999277	309	19	0.999986	312	18.1	0.999986	312	19.1

Tabla 99 Comparativa métodos reparto de carga. Algoritmo radial R-01 variante 2

Redes	Newton-Raphson			Linealización desajuste de potencia			Linealización desajuste de corrientes			Aprox.linealización desajuste de corrientes		
	P _{MS} /P	n _{RC}	t _{CPU}	P _{MS} /P	n _{RC}	t _{CPU}	P _{MS} /P	n _{RC}	t _{CPU}	P _{MS} /P	n _{RC}	t _{CPU}
red10g	0.968103	16	0.203	0.968103	16	0.328	0.968103	16	0.359	0.968103	16	0.344
red14c	1	18	0.469	1	18	0.234	1	18	0.109	1	18	0.109
red16a	1	37	0.422	1	37	0.156	1	37	0.125	1	37	0.125
red33bw	1	32	0.453	1	32	0.156	1	32	0.172	1	32	0.172
red69cj	1	44	0.766	1	44	0.234	1	44	0.297	1	44	0.297
red69d	0.987989	86	1.61	0.999849	62	0.391	0.987989	86	0.516	0.987989	86	0.531
red84sl	0.998871	130	2.63	0.99831	121	0.656	0.998871	130	0.797	0.998871	130	0.703
red118z	0.992162	168	4.98	0.978731	150	1.45	0.992162	168	1.77	0.992162	168	1.72
red137p	1	108	3.89	1	108	1.47	1	108	1.66	1	108	1.61
red205p	0.970071	197	10.5	0.970065	185	4.05	0.970065	185	3.81	0.970065	185	4.75
red273	0.99455	292	28.9	0.993835	293	18.2	0.99455	293	17.2	0.99455	293	19

Tabla 100 Comparativa métodos reparto de carga. Algoritmo radial R-02

Redes	Newton-Raphson			Linealización desajuste de potencia			Linealización desajuste de corrientes			Aprox.linealización desajuste de corrientes		
	P _{MS} /P	n _{RC}	t _{CPU}	P _{MS} /P	n _{RC}	t _{CPU}	P _{MS} /P	n _{RC}	t _{CPU}	P _{MS} /P	n _{RC}	t _{CPU}
red10g	0.968103	12	0.234	0.968103	12	0.141	0.968103	12	0.141	0.968103	12	0.141
red14c	1	22	0.313	1	24	0.109	1	24	0.0938	1	24	0.0938
red16a	1	37	0.484	1	37	0.125	1	37	0.141	1	37	0.141
red33bw	1	38	0.594	1	40	0.203	1	40	0.188	1	40	0.188
red69cj	1	52	1.2	1	58	0.578	1	52	0.547	1	52	0.516
red69d	0.987989	83	1.98	0.999849	54	0.484	0.987989	83	0.75	0.987989	83	0.703
red84sl	1	133	3.33	0.999437	124	0.984	1	133	1.19	1	133	1.08
red118z	0.994134	177	6.45	0.994134	177	2.59	0.994134	177	3.14	0.994134	177	2.83
red137p	1	122	6.3	1	128	2.95	1	122	3.73	1	122	3.44
red205p	0.970071	213	14.5	0.970065	215	7	0.970065	200	7.27	0.970065	200	7.17
red273	0.99455	310	39.4	0.993835	318	26	0.99455	313	27.3	0.99455	313	28

Tabla 101 Comparativa métodos reparto de carga. Algoritmo radial R-02 variante 1

Redes	Newton-Raphson			Linealización desajuste de potencia			Linealización desajuste de corrientes			Aprox.linealización desajuste de corrientes		
	P _{MS} /P	n _{RC}	t _{CPU}	P _{MS} /P	n _{RC}	t _{CPU}	P _{MS} /P	n _{RC}	t _{CPU}	P _{MS} /P	n _{RC}	t _{CPU}
red10g	0.968103	12	0.156	0.968103	12	0.0625	0.968103	12	0.0625	0.968103	12	0.0625
red14c	1	22	0.281	1	24	0.0625	1	24	0.0781	1	24	0.0625
red16a	1	28	0.391	1	29	0.109	1	29	0.125	1	29	0.156
red33bw	1	75	1.08	1	54	0.266	1	76	0.375	1	76	0.406
red69cj	1	48	1.14	1	54	0.547	1	48	0.563	1	48	0.516
red69d	0.983527	81	1.94	0.999849	97	0.875	0.983527	82	0.734	0.983527	82	0.688
red84sl	1	126	3.16	0.999437	90	0.734	1	126	1.17	1	126	1.03
red118z	0.980093	161	5.83	0.978857	162	2.42	0.980093	160	2.7	0.980093	160	2.61
red137p	1	111	6.33	1	121	4.94	1	109	4.72	1	109	4.27
red205p	0.989531	316	18.4	0.989531	312	8.97	1	346	12.9	1	346	10.6
red273	1	459	49.4	0.99929	461	32.3	1	447	33.2	1	447	33

Tabla 102 Comparativa métodos reparto de carga. Algoritmo radial R-02 variante 2

Redes	Newton-Raphson			Linealización desajuste de potencia			Linealización desajuste de corrientes			Aprox.linealización desajuste de corrientes		
	P _{MS} /P	n _{RC}	t _{CPU}	P _{MS} /P	n _{RC}	t _{CPU}	P _{MS} /P	n _{RC}	t _{CPU}	P _{MS} /P	n _{RC}	t _{CPU}
red10g	0.968103	16	0.203	0.968103	16	0.125	0.968103	16	0.125	0.968103	16	0.125
red14c	1	31	0.406	1	33	0.172	1	33	0.172	1	33	0.188
red16a	1	44	0.578	1	44	0.219	1	44	0.25	1	44	0.203
red33bw	1	49	0.781	1	52	0.375	1	52	0.375	1	52	0.391
red69cj	1	64	1.58	1	67	0.875	1	64	0.922	1	64	0.859
red69d	0.987989	97	2.44	0.999849	67	0.922	0.987989	97	1.2	0.987989	97	1.16
red84sl	1	151	4.06	0.999437	142	1.78	1	151	1.92	1	151	1.89
red118z	0.994134	203	8.72	0.994134	203	4.92	0.994134	203	5.13	0.994134	203	5.14
red137p	1	148	9.05	1	148	5.56	1	148	6.98	1	148	6.81
red205p	0.970071	247	26.4	0.970065	241	17	0.970065	235	19.4	0.970065	235	19.7
red273	0.99455	348	71.4	0.993835	352	59.5	0.99455	352	61.7	0.99455	352	56.2

Tabla 103 Comparativa métodos reparto de carga. Algoritmo radial encadenado R-01 plus R-02

Redes	Newton-Raphson			Linealización desajuste de potencia			Linealización desajuste de corrientes			Aprox.linealización desajuste de corrientes		
	P _{MS} /P	n _{RC}	t _{CPU}	P _{MS} /P	n _{RC}	t _{CPU}	P _{MS} /P	n _{RC}	t _{CPU}	P _{MS} /P	n _{RC}	t _{CPU}
red10g	0.968103	24	0.75	0.968103	24	0.328	0.968103	24	0.344	0.968103	24	0.328
red14c	1	30	0.859	1	32	0.281	1	32	0.297	1	32	0.328
red16a	1	52	0.625	1	52	0.156	1	52	0.156	1	52	0.141
red33bw	1	47	0.703	1	48	0.156	1	48	0.219	1	48	0.188
red69cj	1	58	1.11	1	58	0.375	1	58	0.422	1	58	0.375
red69d	0.987989	112	2.34	0.999849	86	0.484	0.987989	112	0.656	0.987989	112	0.563
red84sl	1	190	4.25	0.999437	193	1.16	1	190	1.14	1	190	1.03
red118z	0.994134	275	8.5	0.97868	204	2.28	0.994134	277	3.5	0.994134	277	3.2
red137p	1	140	5.23	1	140	2.2	1	140	2.33	1	140	2.19
red205p	0.970071	247	14.3	0.970065	235	5.84	0.970065	235	7.2	0.970065	235	6.45
red273	0.99455	354	37.5	0.993835	359	20.3	0.99455	356	20.1	0.99455	356	20.3

Algoritmos híbridos

Tabla 104 Comparativa métodos reparto de carga. Algoritmo híbrido M-01 / R-01

Redes	Newton-Raphson			Linealización desajuste de potencia			Linealización desajuste de corrientes			Aprox.linealización desajuste de corrientes		
	P _{MS} /P	n _{RC}	t _{CPU}	P _{MS} /P	n _{RC}	t _{CPU}	P _{MS} /P	n _{RC}	t _{CPU}	P _{MS} /P	n _{RC}	t _{CPU}
red10g	1	21	0.609	1	21	0.219	1	21	0.234	1	21	0.234
red14c	1	16	0.203	1	16	0.0313	1	16	0.0625	1	16	0.0625
red16a	0.999982	39	0.484	0.998003	36	0.0938	0.998003	36	0.109	0.998003	36	0.0781
red33bw	1	26	0.359	1	26	0.0938	1	26	0.0781	1	26	0.0938
red69cj	1	32	0.609	1	32	0.141	1	32	0.172	1	32	0.141
red69d	1	85	1.69	0.999849	85	0.297	1	85	0.406	1	85	0.328
red84sl	0.998871	138	2.92	0.99831	75	0.313	0.998871	138	0.672	0.998871	138	0.547
red118z	1	109	3.03	1	109	0.875	1	109	1.11	1	109	0.813
red137p	1	72	2.05	1	72	0.578	1	72	0.641	1	72	0.578
red205p	1	168	8.63	1	168	3.3	1	168	3.77	1	168	3.5
red273	0.99455	281	25.1	0.993835	282	12.1	0.99455	282	13.5	0.99455	282	12.5

Tabla 105 Comparativa métodos reparto de carga. Algoritmo híbrido M-01 / R-02

Redes	Newton-Raphson			Linealización desajuste de potencia			Linealización desajuste de corrientes			Aprox.linealización desajuste de corrientes		
	P _{MS} /P	n _{RC}	t _{CPU}	P _{MS} /P	n _{RC}	t _{CPU}	P _{MS} /P	n _{RC}	t _{CPU}	P _{MS} /P	n _{RC}	t _{CPU}
red10g	1	21	0.344	1	21	0.172	1	21	0.172	1	21	0.156
red14c	1	22	0.359	1	24	0.109	1	24	0.141	1	24	0.125
red16a	0.999982	46	0.594	0.999982	46	0.172	0.999982	46	0.172	0.999982	46	0.172
red33bw	1	31	0.469	1	32	0.172	1	32	0.172	1	32	0.172
red69cj	1	40	0.906	1	40	0.359	1	40	0.391	1	40	0.359
red69d	1	89	2.02	0.999849	89	0.672	1	89	0.734	1	89	0.672
red84sl	1	156	3.83	0.999437	108	0.766	1	156	1.33	1	156	1.17
red118z	1	128	4.47	1	128	1.77	1	128	2.02	1	128	1.7
red137p	1	88	3.19	1	88	1.27	1	88	1.44	1	88	1.31
red205p	1	178	10.5	1	179	4.78	1	179	5.41	1	179	4.94
red273	0.99455	303	32.3	0.993835	313	19.9	0.99455	307	20.9	0.99455	307	18.4

Tabla 106 Comparativa métodos reparto de carga. Algoritmo híbrido M-02 / R-01

Redes	Newton-Raphson			Linealización desajuste de potencia			Linealización desajuste de corrientes			Aprox.linealización desajuste de corrientes		
	P _{MS} /P	n _{RC}	t _{CPU}	P _{MS} /P	n _{RC}	t _{CPU}	P _{MS} /P	n _{RC}	t _{CPU}	P _{MS} /P	n _{RC}	t _{CPU}
red10g	1	24	0.297	1	24	0.109	1	24	0.0781	1	24	0.0938
red14c	1	18	0.219	1	18	0.0313	1	18	0.0625	1	18	0.0313
red16a	0.999982	43	0.5	0.998003	40	0.109	0.998003	40	0.109	0.998003	40	0.109
red33bw	1	30	0.391	1	30	0.109	1	30	0.0938	1	30	0.109
red69cj	1	36	0.703	1	36	0.156	1	36	0.172	1	36	0.156
red69d	1	79	1.47	0.999849	64	0.266	1	79	0.359	1	79	0.328
red84sl	0.998871	150	3.11	0.99831	87	0.344	0.998871	150	0.734	0.998871	150	0.578
red118z	1	90	2.69	1	90	0.828	1	90	1.02	1	90	0.781
red137p	1	82	2.48	1	82	0.656	1	82	0.797	1	82	0.734
red205p	0.982897	190	9.97	0.982897	190	4.45	0.982897	190	4.75	0.982897	190	4.61
red273	0.99455	305	30.2	0.993835	305	18.6	0.99455	305	17.5	0.99455	305	16.5

Tabla 107 Comparativa métodos reparto de carga. Algoritmo híbrido M-02 / R-02

Redes	Newton-Raphson			Linealización desajuste de potencia			Linealización desajuste de corrientes			Aprox.linealización desajuste de corrientes		
	P _{MS} /P	n _{RC}	t _{CPU}	P _{MS} /P	n _{RC}	t _{CPU}	P _{MS} /P	n _{RC}	t _{CPU}	P _{MS} /P	n _{RC}	t _{CPU}
red10g	1	24	0.359	1	24	0.0938	1	24	0.0938	1	24	0.109
red14c	1	24	0.266	1	26	0.0625	1	26	0.0781	1	26	0.0469
red16a	0.999982	50	0.672	0.999982	50	0.172	0.999982	50	0.172	0.999982	50	0.141
red33bw	1	35	0.531	1	36	0.188	1	36	0.172	1	36	0.188
red69cj	1	44	0.984	1	44	0.375	1	44	0.406	1	44	0.375
red69d	1	83	1.83	0.999849	66	0.453	1	83	0.609	1	83	0.594
red84sl	1	168	4.03	0.999437	120	0.828	1	168	1.38	1	168	1.25
red118z	1	101	3.45	1	101	1.33	1	101	1.5	1	101	1.28
red137p	1	98	3.44	1	98	1.41	1	98	1.56	1	98	1.47
red205p	0.982971	254	15.6	0.982971	255	7.97	0.982971	255	8.59	0.982971	255	8.28
red273	0.99455	330	36.9	0.993835	340	24.2	0.99455	334	24.4	0.99455	334	22

Tabla 108 Comparativa métodos reparto de carga. Algoritmo híbrido M-03 / R-01

Redes	Newton-Raphson			Linealización desajuste de potencia			Linealización desajuste de corrientes			Aprox.linealización desajuste de corrientes		
	P _{MS} /P	n _{RC}	t _{CPU}	P _{MS} /P	n _{RC}	t _{CPU}	P _{MS} /P	n _{RC}	t _{CPU}	P _{MS} /P	n _{RC}	t _{CPU}
red10g	1	24	0.297	1	24	0.0781	1	24	0.0938	1	24	0.0625
red14c	1	19	0.25	1	21	0.0625	1	21	0.0625	1	21	0.0938
red16a	0.999982	43	0.5	0.998003	40	0.109	0.998003	40	0.141	0.998003	40	0.0938
red33bw	1	33	0.469	1	34	0.125	1	34	0.141	1	34	0.141
red69cj	1	36	0.719	1	36	0.172	1	36	0.219	1	36	0.203
red69d	1	79	1.55	0.999849	64	0.266	1	79	0.375	1	79	0.344
red84sl	0.998871	150	3.11	0.99831	87	0.406	0.998871	150	0.766	0.998871	150	0.625
red118z	1	91	2.8	1	91	0.828	1	91	1.03	1	91	0.828
red137p	1	82	2.44	1	82	0.75	1	82	0.859	1	82	0.766
red205p	0.982897	191	10	0.982897	191	4.56	0.982897	191	4.92	0.982897	191	4.69
red273	0.99455	305	30.7	0.993835	305	18.7	0.99455	305	16.8	0.99455	305	16.4

Tabla 109 Comparativa métodos reparto de carga. Algoritmo híbrido M-03 / R-02

Redes	Newton-Raphson			Linealización desajuste de potencia			Linealización desajuste de corrientes			Aprox.linealización desajuste de corrientes		
	P _{MS} /P	n _{RC}	t _{CPU}	P _{MS} /P	n _{RC}	t _{CPU}	P _{MS} /P	n _{RC}	t _{CPU}	P _{MS} /P	n _{RC}	t _{CPU}
red10g	1	24	0.281	1	24	0.0938	1	24	0.0469	1	24	0.0938
red14c	1	25	0.313	1	29	0.0938	1	29	0.109	1	29	0.0781
red16a	0.999982	50	0.656	0.999982	50	0.141	0.999982	50	0.172	0.999982	50	0.172
red33bw	1	38	0.578	1	40	0.172	1	40	0.188	1	40	0.203
red69cj	1	44	1.03	1	44	0.391	1	44	0.422	1	44	0.375
red69d	1	83	1.83	0.999849	66	0.484	1	83	0.625	1	83	0.594
red84sl	1	168	4	0.999437	120	0.844	1	168	1.41	1	168	1.22
red118z	1	102	3.48	1	102	1.41	1	102	1.52	1	102	1.27
red137p	1	98	3.58	1	98	1.5	1	98	1.61	1	98	1.48
red205p	0.982971	255	15.6	0.982971	256	8.11	0.982971	256	8.75	0.982971	256	8.31
red273	0.99455	330	37.5	0.993835	340	24.5	0.99455	334	24	0.99455	334	22.1

Tabla 110 Comparativa métodos reparto de carga. Algoritmo híbrido M-04 / R-01

Redes	Newton-Raphson			Linealización desajuste de potencia			Linealización desajuste de corrientes			Aprox.linealización desajuste de corrientes		
	P _{MS} /P	n _{RC}	t _{CPU}	P _{MS} /P	n _{RC}	t _{CPU}	P _{MS} /P	n _{RC}	t _{CPU}	P _{MS} /P	n _{RC}	t _{CPU}
red10g	1	25	0.406	1	25	0.234	1	25	0.234	1	25	0.234
red14c	1	22	0.891	1	22	0.438	1	22	0.422	1	22	0.5
red16a	0.999982	50	0.656	0.998003	48	0.125	0.998003	48	0.156	0.998003	48	0.156
red33bw	1	34	0.547	1	35	0.156	1	35	0.156	1	35	0.172
red69cj	1	36	0.703	1	36	0.172	1	36	0.234	1	36	0.188
red69d	1	84	1.69	0.999849	69	0.422	1	84	0.516	1	84	0.438
red84sl	1	155	3.44	0.999437	91	0.594	1	154	0.938	1	154	0.844
red118z	1	98	3.17	1	98	1.14	1	98	1.25	1	98	1.14
red137p	1	85	3.39	1	85	1.31	1	85	1.53	1	85	1.33
red205p	1	200	10.6	1	200	5.08	1	200	5.75	1	200	4.97
red273	0.99455	319	32.6	0.993835	319	20	0.99455	319	22.8	0.99455	319	16.8

Tabla 111 Comparativa métodos reparto de carga. Algoritmo híbrido M-04 / R-02

Redes	Newton-Raphson			Linealización desajuste de potencia			Linealización desajuste de corrientes			Aprox.linealización desajuste de corrientes		
	P _{MS} /P	n _{RC}	t _{CPU}	P _{MS} /P	n _{RC}	t _{CPU}	P _{MS} /P	n _{RC}	t _{CPU}	P _{MS} /P	n _{RC}	t _{CPU}
red10g	1	25	0.328	1	25	0.0938	1	25	0.0938	1	25	0.0781
red14c	1	28	0.781	1	30	0.594	1	30	0.547	1	30	0.578
red16a	0.999982	57	0.75	0.999982	58	0.188	0.999982	58	0.234	0.999982	58	0.188
red33bw	1	39	0.625	1	41	0.219	1	41	0.25	1	41	0.203
red69cj	1	44	1.02	1	44	0.438	1	44	0.469	1	44	0.438
red69d	1	88	2.03	0.999849	71	0.563	1	88	0.766	1	88	0.719
red84sl	1	173	4.33	0.999437	99	0.875	1	172	1.64	1	172	1.45
red118z	1	109	3.88	1	109	1.67	1	109	1.8	1	109	1.63
red137p	1	101	4.69	1	101	2.47	1	101	2.59	1	101	2.41
red205p	1	210	12.8	1	217	6.77	1	217	7.42	1	217	6.95
red273	0.99455	344	39.8	0.993835	354	23.5	0.99455	348	28.7	0.99455	348	23.3

Algoritmos híbridos con reinicio

Tabla 112 Comparativa métodos reparto de carga. Algoritmo híbrido con reinicio M-01 / R-01

Redes	Newton-Raphson			Linealización desajuste de potencia			Linealización desajuste de corrientes			Aprox.linealización desajuste de corrientes		
	P _{MS} /P	n _{RC}	t _{CPU}	P _{MS} /P	n _{RC}	t _{CPU}	P _{MS} /P	n _{RC}	t _{CPU}	P _{MS} /P	n _{RC}	t _{CPU}
red10g	1	21	0.641	1	21	0.219	1	21	0.234	1	21	0.234
red14c	1	16	0.203	1	16	0.0469	1	16	0.0469	1	16	0.0625
red16a	0.999982	58	0.797	0.998003	44	0.0938	0.998003	44	0.125	0.998003	44	0.172
red33bw	1	26	0.359	1	26	0.109	1	26	0.0938	1	26	0.125
red69cj	1	39	0.75	1	39	0.141	1	39	0.219	1	39	0.219
red69d	1	85	1.66	0.999849	88	0.344	1	85	0.422	1	85	0.375
red84sl	0.998871	173	3.83	0.99831	96	0.406	0.998871	173	0.891	0.998871	173	0.781
red118z	1	118	3.36	1	118	0.844	1	118	0.984	1	118	0.953
red137p	1	115	3.36	1	115	0.797	1	115	1.09	1	115	0.922
red205p	1	468	21.2	1	468	6.66	1	468	9.78	1	468	7.75
red273	0.979638	492	34.1	0.985541	485	13.3	0.983847	493	17.1	0.983847	493	16.6

Tabla 113 Comparativa métodos reparto de carga. Algoritmo híbrido con reinicio M-01 / R-02

Redes	Newton-Raphson			Linealización desajuste de potencia			Linealización desajuste de corrientes			Aprox.linealización desajuste de corrientes		
	P _{MS} /P	n _{RC}	t _{CPU}	P _{MS} /P	n _{RC}	t _{CPU}	P _{MS} /P	n _{RC}	t _{CPU}	P _{MS} /P	n _{RC}	t _{CPU}
red10g	1	21	0.313	1	21	0.141	1	21	0.141	1	21	0.172
red14c	1	22	0.313	1	24	0.125	1	24	0.109	1	24	0.0938
red16a	0.999982	67	0.938	0.999982	67	0.219	0.999982	67	0.25	0.999982	67	0.234
red33bw	1	31	0.406	1	32	0.141	1	32	0.172	1	32	0.156
red69cj	1	47	1.06	1	47	0.438	1	47	0.469	1	47	0.453
red69d	1	89	1.98	0.999849	92	0.719	1	89	0.719	1	89	0.672
red84sl	1	234	5.83	0.999437	146	1.03	1	234	2.03	1	234	1.83
red118z	1	137	4.66	1	137	1.8	1	137	2.06	1	137	1.88
red137p	1	136	4.95	1	136	1.7	1	136	2.2	1	136	1.84
red205p	1	412	21.4	1	412	8.69	1	412	11.3	1	412	9.64
red273	0.979638	525	40.2	0.985541	514	18.9	0.983847	530	21.7	0.983847	530	18.3

Tabla 114 Comparativa métodos reparto de carga. Algoritmo híbrido con reinicio M-02 / R-01

Redes	Newton-Raphson			Linealización desajuste de potencia			Linealización desajuste de corrientes			Aprox.linealización desajuste de corrientes		
	P _{MS} /P	n _{RC}	t _{CPU}	P _{MS} /P	n _{RC}	t _{CPU}	P _{MS} /P	n _{RC}	t _{CPU}	P _{MS} /P	n _{RC}	t _{CPU}
red10g	1	24	0.297	1	24	0.109	1	24	0.0938	1	24	0.125
red14c	1	18	0.188	1	18	0.0313	1	18	0.0469	1	18	0.0625
red16a	0.999982	64	0.844	0.998003	50	0.156	0.998003	50	0.156	0.998003	50	0.172
red33bw	1	30	0.469	1	30	0.0938	1	30	0.125	1	30	0.125
red69cj	1	45	0.859	1	45	0.172	1	45	0.234	1	45	0.25
red69d	1	95	1.8	0.999849	64	0.25	1	95	0.453	1	95	0.438
red84sl	0.998871	195	4.31	0.99831	117	0.5	0.998871	195	1.06	0.998871	195	0.906
red118z	1	90	2.72	1	90	0.75	1	90	0.922	1	90	0.844
red137p	1	138	4.25	1	138	1.19	1	138	1.61	1	138	1.3
red205p	1	584	30.4	0.979944	292	6.3	1	584	15.4	1	584	15.4
red273	0.979638	626	59.9	0.983847	626	33.5	0.983847	626	33.6	0.983847	626	32.2

Tabla 115 Comparativa métodos reparto de carga. Algoritmo híbrido con reinicio M-02 / R-02

Redes	Newton-Raphson			Linealización desajuste de potencia			Linealización desajuste de corrientes			Aprox.linealización desajuste de corrientes		
	P _{MS} /P	n _{RC}	t _{CPU}	P _{MS} /P	n _{RC}	t _{CPU}	P _{MS} /P	n _{RC}	t _{CPU}	P _{MS} /P	n _{RC}	t _{CPU}
red10g	1	24	0.281	1	24	0.0781	1	24	0.0469	1	24	0.0781
red14c	1	24	0.328	1	26	0.0781	1	26	0.0938	1	26	0.0781
red16a	0.999982	73	0.953	0.999982	73	0.219	0.999982	73	0.25	0.999982	73	0.297
red33bw	1	35	0.531	1	36	0.172	1	36	0.172	1	36	0.172
red69cj	1	53	1.16	1	53	0.453	1	53	0.453	1	53	0.453
red69d	1	99	2.16	0.999849	66	0.422	1	99	0.734	1	99	0.719
red84sl	1	258	6.41	0.999437	169	1.14	1	258	2.2	1	258	2
red118z	1	101	3.47	1	101	1.25	1	101	1.42	1	101	1.34
red137p	1	159	5.56	1	159	2.09	1	159	2.48	1	159	2.25
red205p	1	618	34.6	0.979944	327	8.3	1	621	18.7	1	621	18
red273	0.979638	663	66	0.983847	663	36.6	0.983847	663	38.3	0.983847	663	36

Tabla 116 Comparativa métodos reparto de carga. Algoritmo híbrido con reinicio M-03 / R-01

Redes	Newton-Raphson			Linealización desajuste de potencia			Linealización desajuste de corrientes			Aprox.linealización desajuste de corrientes		
	P _{MS} /P	n _{RC}	t _{CPU}	P _{MS} /P	n _{RC}	t _{CPU}	P _{MS} /P	n _{RC}	t _{CPU}	P _{MS} /P	n _{RC}	t _{CPU}
red10g	1	24	0.297	1	24	0.0625	1	24	0.0938	1	24	0.141
red14c	1	19	0.234	1	21	0.0781	1	21	0.0625	1	21	0.0938
red16a	0.999982	64	0.828	0.998003	50	0.125	0.998003	50	0.156	0.998003	50	0.188
red33bw	1	33	0.469	1	34	0.125	1	34	0.141	1	34	0.156
red69cj	1	45	0.922	1	45	0.234	1	45	0.25	1	45	0.313
red69d	1	95	1.89	0.999849	64	0.266	1	95	0.484	1	95	0.453
red84sl	0.998871	196	4.38	0.99831	117	0.547	0.998871	196	1.11	0.998871	196	0.984
red118z	1	91	2.7	1	91	0.813	1	91	0.922	1	91	0.891
red137p	1	138	4.28	1	138	1.31	1	138	1.67	1	138	1.42
red205p	1	593	31.6	0.979944	296	6.5	1	593	16.2	1	593	16.3
red273	0.979638	626	60.8	0.983847	626	33.9	0.983847	626	34.8	0.983847	626	29.3

Tabla 117 Comparativa métodos reparto de carga. Algoritmo híbrido con reinicio M-03 / R-02

Redes	Newton-Raphson			Linealización desajuste de potencia			Linealización desajuste de corrientes			Aprox.linealización desajuste de corrientes		
	P _{MS} /P	n _{RC}	t _{CPU}	P _{MS} /P	n _{RC}	t _{CPU}	P _{MS} /P	n _{RC}	t _{CPU}	P _{MS} /P	n _{RC}	t _{CPU}
red10g	1	24	0.313	1	24	0.0469	1	24	0.0938	1	24	0.0938
red14c	1	25	0.328	1	29	0.0938	1	29	0.109	1	29	0.109
red16a	0.999982	73	0.984	0.999982	73	0.266	0.999982	73	0.281	0.999982	73	0.297
red33bw	1	38	0.563	1	40	0.172	1	40	0.203	1	40	0.219
red69cj	1	53	1.25	1	53	0.5	1	53	0.516	1	53	0.531
red69d	1	99	2.2	0.999849	66	0.453	1	99	0.781	1	99	0.719
red84sl	1	259	6.48	0.999437	169	1.2	1	259	2.28	1	259	2.05
red118z	1	102	3.47	1	102	1.28	1	102	1.47	1	102	1.38
red137p	1	159	5.59	1	159	2.17	1	159	2.59	1	159	2.33
red205p	1	626	35.7	0.979944	331	8.52	1	629	19.5	1	629	19.1
red273	0.979638	663	66	0.983847	663	39.5	0.983847	663	40.4	0.983847	663	36.2

Tabla 118 Comparativa métodos reparto de carga. Algoritmo híbrido con reinicio M-04 / R-01

Redes	Newton-Raphson			Linealización desajuste de potencia			Linealización desajuste de corrientes			Aprox.linealización desajuste de corrientes		
	P _{MS} /P	n _{RC}	t _{CPU}	P _{MS} /P	n _{RC}	t _{CPU}	P _{MS} /P	n _{RC}	t _{CPU}	P _{MS} /P	n _{RC}	t _{CPU}
red10g	1	25	0.359	1	25	0.219	1	25	0.219	1	25	0.203
red14c	1	22	0.734	1	22	0.422	1	22	0.828	1	22	0.859
red16a	0.999982	86	1.08	0.998003	64	0.172	0.998003	65	0.234	0.998003	64	0.234
red33bw	1	34	0.469	1	35	0.156	1	35	0.172	1	35	0.156
red69cj	1	45	0.922	1	45	0.234	1	45	0.281	1	45	0.313
red69d	1	104	2.11	0.999849	69	0.391	1	104	0.656	1	104	0.625
red84sl	1	206	4.72	0.999437	126	0.844	1	205	1.41	1	205	1.33
red118z	1	98	3.13	1	98	1.08	1	98	1.44	1	98	1.19
red137p	1	148	5.16	1	148	2.13	1	148	2.44	1	148	2.19
red205p	1	625	31.8	1	625	15	1	625	17.3	1	625	16.4
red273	0.985447	626	65	0.985447	709	44.6	0.985447	624	46.3	0.985447	624	37.9

Tabla 119 Comparativa métodos reparto de carga. Algoritmo híbrido con reinicio M-04 / R-02

Redes	Newton-Raphson			Linealización desajuste de potencia			Linealización desajuste de corrientes			Aprox.linealización desajuste de corrientes		
	P _{MS} /P	n _{RC}	t _{CPU}	P _{MS} /P	n _{RC}	t _{CPU}	P _{MS} /P	n _{RC}	t _{CPU}	P _{MS} /P	n _{RC}	t _{CPU}
red10g	1	25	0.313	1	25	0.0781	1	25	0.0938	1	25	0.109
red14c	1	28	0.984	1	30	0.578	1	30	0.547	1	30	0.578
red16a	0.999982	95	1.23	0.999982	95	0.328	0.999982	96	0.391	0.999982	95	0.406
red33bw	1	39	0.641	1	41	0.219	1	41	0.234	1	41	0.219
red69cj	1	53	1.23	1	53	0.531	1	53	0.547	1	53	0.516
red69d	1	108	2.39	0.999849	71	0.594	1	108	0.922	1	108	0.891
red84sl	1	225	5.67	0.999437	134	1.14	1	224	2.2	1	224	1.97
red118z	1	109	3.8	1	109	1.56	1	109	1.73	1	109	1.69
red137p	1	169	6.56	1	169	2.89	1	169	3.33	1	169	3.06
red205p	1	563	30.4	1	564	15.3	1	564	17.2	1	564	16.7
red273	0.985447	649	70.5	0.985447	743	46.7	0.985447	650	49.7	0.985447	650	48.3

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Ali Abur, A modified linear programming method for distribution system reconfiguration, *International Journal of Electrical Power & Energy Systems* 18 (7) (1996) 469-474.
- [2] Aoki, K. et al., Totally automated switching in distribution system, *IEEE Trans. Power Delivery* 5 (1) (1990) 514-526.
- [3] Aoki, K., Nara, K., Satoh, T., Kuwabara, H. and Ichimori, T., Sub-optimal re-configuration of distribution systems, *Proc. 3rd Symp. Expert Systems Application to Power Systems (ESAPS)*, Tokyo and Kobe, Japan, (1991) 463-470.
- [4] Augugliaro, A., Dusonchet, L. and Mangione, S., An efficient greedy approach for minimum loss reconfiguration of distribution networks, *Electric Power Systems Research* 35 (3) (1995) 167-176.
- [5] Baran, M.E., Wu, F.F., Network reconfiguration in distribution systems for loss reduction and load balancing, *IEEE Transactions on Power Delivery* 4 (2) (1989) 1401-1407.
- [6] Borožan, V.; Rajicic, D.; Ackovski, R., Improved method for loss minimization in distribution networks, *IEEE Transactions on Power Systems* 10 (3) (1995) 1420-1425.
- [7] Broadwater, R.P., Khan, A.H., Shaalan, H.E. and Lee, R.E., Time varying load analysis to reduce distribution losses through reconfiguration, *IEEE Trans. Power Delivery* 8 (1) (1993) 294-300.
- [8] Broadwater, R.P., Dolloff, P.A., Herdman, T.L., Karamikhova, R. and Sargent, A.F., Minimum loss optimization in distribution systems: discrete ascent optimal programming, *Electric Power Systems Research* 36 (2) (1996) 113-121.
- [9] Castro, C. A. Jr. and Watanabe, A. A., An efficient reconfiguration algorithm for loss reduction of distribution systems, *Electric Power Systems Research* 19 (2) (1990) 137-144.
- [10] Chang, G., Zrida J. and Birdwell, J.D., Knowledge-based distribution system analysis

- and reconfiguration, *IEEE Trans. Power Syst.* 5 (3) (1990) 744-749.
- [11] Chang, Hong-Chan and Kuo, Cheng-Chien, Network reconfiguration in distribution systems using simulated annealing, *Electric Power Systems Research* 29 (3) (1994) 227-238.
- [12] Chen, C.S. and Cho, M.Y., Energy loss reduction by critical switches, *IEEE Trans. Power Delivery* 8 (3) (1993) 1246-1253.
- [13] Cherkaoui, R., Bart, A. and Germond, A.J., Optimal configuration of electrical distribution networks using heuristic methods, *Proc. 11th Power System Computation Conf. (PSCC)*, Avignon, France, (1993) 147-154.
- [14] Chiang, H.-D., Jean-Jumeau, R., Optimal network reconfigurations in distribution systems. Part 2: Solutions algorithms and numerical results, *IEEE Transactions on Power Delivery* 5 (3) (1990) 1568-1574.
- [15] Chiang, H.-D., Jean-Jumeau, R., Optimal network reconfigurations in distribution systems. Part I: A new formulation and a solution methodology, *IEEE Transactions on Power Delivery* 5 (4) (1990) 1902-1909.
- [16] Chiou, Ji-Pyng, Chang, Chung-Fu, and Su, Ching-Tzong, Variable scaling hybrid differential evolution for solving network reconfiguration of distribution systems, *IEEE Transactions on Power Systems* 20 (2) (2005) 668-674.
- [17] Civanlar, S., Grainger, J.J., Yin, H., Lee, S.S.H., Distribution feeder reconfiguration for loss reduction, *IEEE Transactions on Power Delivery* 3 (3) (1988) 1217-1223.
- [18] Dan Jiang, Baldick, R., Optimal electric distribution system switch reconfiguration and capacitor control, *IEEE Transactions on Power Systems* 11 (2) (1996) 890-897.
- [19] Das, D., A Fuzzy Multiobjective Approach for Network Reconfiguration of Distribution Systems, *IEEE Transactions on Power Delivery* 21 (1) (2006) 202-209.
- [20] Delbem, A.C.B., de Carvalho, A.C.Pd.L.F., Bretas, N.G., Main chain representation for evolutionary algorithms applied to distribution system reconfiguration, *IEEE Transactions on Power Systems* 20 (1) (2005) 425-436.
- [21] Fan, Ji-Yuan, Zhang, Lan, McDonald, J. D., Distribution Network Reconfiguration: Single Loop Optimization, *IEEE Transactions on Power Systems* 11 (3) (1996) 1643-1647.
- [22] Glamocanin, V., Optimal loss reduction of distribution networks, *IEEE Trans. Power Syst.*, 5 (3) (1990) 774-782.
- [23] Gnadet, P.A. and Lawler, J.S., *Automating Electric Utility Distribution Systems: the Athens Automation and Control Experiment*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, (1990).
- [24] Gohokar, V. N., Khedkar, M. K. and Dhole, G. M., Formulation of distribution reconfiguration problem using network topology: a generalized approach, *Electric*

- Power Systems Research 69 (2-3) (2004) 304-310.
- [25] Gomes, F.V., Carneiro, S., Jr., Pereira, J.L.R., Vinagre, M.P., Garcia, P.A.N., Araujo, L.R., A New Heuristic Reconfiguration Algorithm for Large Distribution Systems, IEEE Transactions on Power Systems 20 (3) (2005) 1373-1378.
- [26] Gomes, F.V., Carneiro, S., Jr., Pereira, J.L.R., Vinagre, M.P., Garcia, P.A.N., De Araujo, L.R., A New Distribution System Reconfiguration Approach Using Optimum Power Flow and Sensitivity Analysis for Loss Reduction, IEEE Transactions on Power Systems 21(4) (2006) 1616-1623.
- [27] Goswami, S.K., Basu, S.K., A new algorithm for the reconfiguration of distribution feeders for loss minimization, IEEE Transactions on Power Delivery 7 (3) (1992) 1484-1491.
- [28] Hsu, Y.Y. et al., Distribution system service restoration using a heuristic search approach, IEEE Trans. Power Delivery 7 (2) (1992) 734-740.
- [29] Hsu, C. T., Tzeng, Y. M., Chen, C. S. and Cho, M. Y., Distribution feeder loss analysis by using an artificial neural network, Electric Power Systems Research 34 (2) (1995) 85-90.
- [30] Hsu, Y.Y. and Jwo-Hwu, Y., Planning of distribution feeder reconfiguration with protective device coordination, IEEE Trans. Power Delivery 8 (3) (1993) 1340-1347.
- [31] Huang, Y.-C., Enhanced genetic algorithm-based fuzzy multi-objective approach to distribution network reconfiguration Generation, Transmission and Distribution, IEE Proceedings 149 (5) (2002) 615-620.
- [32] Huddleston, C. T., Broadwater, R. P. and Chandrasekaran, A., Reconfiguration algorithm for minimizing losses in radial electric distribution systems, Electric Power Systems Research-18 (1) (1990) 57-66.
- [33] Jasmon, G. B. and Callistus, L. H, A modified technique for minimization of distribution system losses, Electric Power Systems Research 20 (2) (1991) 81-88.
- [34] Jeon, Young-Jae, Kim, Jae-Chul, Kim, Jin-O, Shin, Joong-Rin and, Lee, K.Y., An efficient simulated annealing algorithm for network reconfiguration in large-scale distribution systems, IEEE Transactions on Power Delivery 17 (4) (2002) 1070-1078.
- [35] Jeon, Young-Jae and Kim, Jae-Chul, Application of simulated annealing and tabu search for loss minimization in distribution systems, International Journal of Electrical Power & Energy Systems 26 (1) (2004) 9-18.
- [36] Jung, Kyung-Hee, Kim, Hoyong and Ko, Yunseok, Network reconfiguration algorithm for automated distribution systems based on artificial intelligence approach, IEEE Transactions on Power Delivery 8 (4) (1993) 1933-1941.
- [37] Kashem, M. A., Jasmon, G. B., Mohamed, A. and Moghavvemi, M., Artificial neural network approach to network reconfiguration for loss minimization in distribution

- networks, *International Journal of Electrical Power & Energy Systems* 20 (4) (1998) 247-258.
- [38] Kashem, M. A., Jasmon, G. B. and Ganapathy, V., A new approach of distribution system reconfiguration for loss minimization, *International Journal of Electrical Power & Energy Systems* 22 (4) (2000) 269-276.
- [39] Kashem, M. A., Ganapathy, V. and Jasmon, G. B., A geometrical approach for network reconfiguration based loss minimization in distribution systems, *International Journal of Electrical Power & Energy Systems* 23 (4) (2001) 295-304.
- [40] Kim, H., Ko, Y., Jung, K.-H., Artificial neural-network based feeder reconfiguration for loss reduction in distribution systems, *IEEE Transactions on Power Delivery* 8 (3) (1993) 1356-1366.
- [41] Lee, T. E., Cho, M. Y. and Chen, C. S., Distribution system reconfiguration to reduce resistive losses, *Electric Power Systems Research* 30 (1) (1994) 25-33.
- [42] Lin, W.-M., Cheng, F.-S., Tsay, M.-T., Distribution feeder reconfiguration with refined genetic algorithm, *Generation, Transmission and Distribution, IEE Proceedings* 147 (6) (2000) 349-354.
- [43] Lin, Whei-Min and Chin, Hong-Chan, A new approach for distribution feeder reconfiguration for loss reduction and service restoration, *IEEE Transactions on Power Delivery* 13 (3) (1998) 870-875.
- [44] Liu, C.C., Lee, S.J., Vu, K., Loss minimization of distribution feeders: optimality and algorithms, *IEEE Transactions on Power Delivery* 4 (2) (1989) 1281-1289.
- [45] López, E., Opazo, H., García, L. and Bastard, P., On line reconfiguration considering variability demand: Applications to real networks, *IEEE Transactions on Power System* 19, (1) (2004) 549-553.
- [46] Markushevich, N.S., Herejk, I.C. and Nielson, R.E., Functional requirements and cost benefit study for distribution automation at B.C. Hydro, *Proc. IEEE Power Industry Computer Applications (PICA) Conf.* (1993) 169-178.
- [47] Martín, J.A. And Gil, A.J., A new heuristic approach for distribution system loss reduction, *Electric Power Systems Research* 78 (2008) 1953-1958.
- [48] McDermott, T.E., Drezga, I., Broadwater, R.P., A heuristic nonlinear constructive method for distribution system reconfiguration, *IEEE Transactions on Power Systems* 14 (2) (1999) 478-483.
- [49] Merlin, A., Back, H., Search for a minimal-loss operation spanning tree configuration in an urban power distribution system, 1975. *Proceedings of 5th Power System Computation Conference*, Cambridge U.K. (1975).
- [50] Patton, J.B., Ritzky, D.T. and Lawler, J.S., Applications software for modeling distribution automation operations on the Athens utilities board, *IEEE Trans. Power*

- Delivery, 5 (2) (1990) 1019-1025.
- [51] Prasad, K., Ranjan, R., Sahoo, N.C., Chaturvedi, A., Optimal reconfiguration of radial distribution systems using a fuzzy mutated genetic algorithm, IEEE Transactions on Power Delivery 20,(2) (2005) 1211-1213.
- [52] Ramos, E.R., Exposito, A.G., Santos, J.R., Iborra, F.L., Path-based distribution network modeling: application to reconfiguration for loss reduction, IEEE Transactions on Power Systems 20 (2) (2005) 556-564.
- [53] Raju, G.K.V. Y Bijwe, P.R., An efficient algorithm for minimum loss reconfiguration of distribution system based on sensitivity and heuristics, IEEE Transactions on Power Systems 23 (3) (2008) 1280-1287.
- [54] Roytelman, I., Melnik, V., Lee, S.S.H., Lugtu, R.L., Multi-objective feeder reconfiguration by distribution management system, IEEE Transactions on Power Systems 11 (2) (1996) 661-667.
- [55] Salazar, H., Gallego, R., Romero, R., Artificial neural networks and clustering techniques applied in the reconfiguration of distribution systems, IEEE Transactions on Power Delivery 21 (3) (2006) 1735-1742.
- [56] Sarfi, R.J., Salama, M.M.A., Chikhani, A.Y., Distribution system reconfiguration for loss reduction: an algorithm based on network partitioning theory, IEEE Transactions on Power Systems 11 (1) (1996) 504-510.
- [57] Sarma, N. D. R. and Prakasa Rao, K. S., A new 0-1 integer programming method of feeder reconfiguration for loss minimization in distribution systems, Electric Power Systems Research 33 (2) (1995) 125-131.
- [58] Schmidt, H.P., Ida, N., Kagan, N., Guaraldo, J.C., Fast Reconfiguration of Distribution Systems Considering Loss Minimization, IEEE Transactions on Power Systems 20 (3) (2005) 1311-1319.
- [59] Shirmohammadi, D., Hong, H.W., Reconfiguration of electric distribution networks for resistive line losses reduction, IEEE Transactions on Power Delivery 4 (2) (1989) 1492-1498.
- [60] Singh, S.P., Raju, G.S., Rao, G.K. and Afsari, M., A heuristic method for feeder reconfiguration and service restoration in distribution networks, Electrical Power and Energy Systems 31 (2009) 309-314.
- [61] Song, Y.H., Wang, G.S., Johns, A.T., Wang, P.Y., Distribution network reconfiguration for loss reduction using fuzzy controlled evolutionary programming. Generation, Transmission and Distribution, IEE Proceedings 144 (4) (1997) 345-350.
- [62] Stott, B., Review of load-flow calculation methods, Proceedings of the IEEE, 62 (7) (1974) 916-929.
- [63] Su, Ching-Tzong, Chang, Chung-Fu and Chiou, Ji-Pyng, Distribution network

- reconfiguration for loss reduction by ant colony search algorithm, *Electric Power Systems Research* 75 (2-3) (2005) 190-199.
- [64] Su, Ching-Tzong and Lee, Chu-Sheng, Network reconfiguration of distribution systems using improved mixed-integer hybrid differential evolution, *IEEE Transactions on Power Delivery* 18 (3) (2003) 1022-1027.
- [65] Taylor, T., Lubkeman, D., Implementation of heuristic search strategies for distribution feeder reconfiguration, *IEEE Transactions on Power Delivery* 5 (1) (1990) 239-246.
- [66] Venkatesh, B., Ranjan, R., Gooi, H.B., Optimal reconfiguration of radial distribution systems to maximize loadability, *IEEE Transactions on Power Systems* 19 (1) (2004) 260-266.
- [67] Venkatesh, B., Ranjan, R., Optimal radial distribution system reconfiguration using fuzzy adaptation of evolutionary programming, *Electrical Power and Energy Systems* 25 (2003) 775-780.
- [68] Wagner, T.P., Chikhani, A.Y. and Hackam, R., Feeder reconfiguration for loss reduction: an application of distribution automation, *IEEE Trans. Power Delivery*, 6 (4) (1991) 1992-1931.
- [69] Wang, Jin-Cheng, Chiang, Hsiao-Dong, Darling, G.R., An efficient algorithm for real-time network reconfiguration in large scale unbalanced distribution systems, *IEEE Transactions on Power Systems* 11 (1) (1996) 511-517.
- [70] Zhang, D., Fu, Z. and Zhang, L., An improved TS algorithm for loss-minimum reconfiguration in large-scale distribution systems, *Electric Power Systems Research* 77 (5-6) (2007) 685-694.
- [71] Zhu, J. Z., Optimal reconfiguration of electrical distribution network using the refined genetic algorithm, *Electric Power Systems Research* 62 (1) (2002) 37-42.